



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE QUÍMICA

**USO DE *Opuntia albicarpa* Scheinvar COMO COAGULANTE EN EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN QUÍMICA

PRESENTA:

BRENDA BÁRCENA GARCÍA

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. GABRIELA ALEJANDRA VÁZQUEZ RODRÍGUEZ

Pachuca de Soto, Hidalgo

2008

ÍNDICE

	Página
LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Propiedades generales de los coloides	3
2.2 Estabilidad de las partículas coloidales	4
2.3 Coagulación-floculación	5
2.4 Configuración de los procesos de coagulación-floculación de aguas residuales	8
2.4.1 Coagulantes químicos	9
2.4.2 Prueba de jarras	9
2.5 El género <i>Opuntia</i>	11
2.5.1 Especies principales	12
2.5.2 Composición general y química del cactus	13
2.5.3 Aplicaciones de las <i>Opuntias</i>	16
2.6 Uso de coagulantes naturales	17
2.7 Uso de <i>Opuntia</i> spp. como coagulante	19
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	21

3.1 Planteamiento del problema	21
3.2 Justificación	21
4. OBJETIVOS	23
4.1 Objetivo general	23
4.2 Objetivos específicos	23
5. MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1 Muestras de agua	24
5.1.1 Agua residual doméstica	24
5.1.2 Agua residual sintética	24
5.1.3 Agua de pozo sintética	25
5.2 Material biológico	26
5.3 Obtención de los coagulantes	25
5.3.1 Coagulante deshidratado	25
5.3.2 Coagulante tratado con etanol	25
5.3.3 Coagulante con tratamiento térmico	26
5.4 Pruebas de jarras	26
5.5 Técnicas analíticas	27
5.5.1 Determinación de turbidez	27
5.5.2 Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO ₅)	28
5.5.3 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno	29
5.5.4 Determinación de acidez y alcalinidad	30
5.5.5 Determinación del pH	32
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
6.1 Caracterización de las muestras de agua	33
6.2 Selección de la dosis y método de obtención del coagulante	33

para el tratamiento de aguas residuales	
6.2.1 Pruebas de jarras con el coagulante deshidratado sin tratamiento previo	33
6.2.2 Pruebas de jarras con el coagulante tratado con etanol	40
6.2.3 Pruebas de jarras con el coagulante tratado térmicamente	44
6.3 Selección de la dosis y método de obtención del coagulante para el tratamiento de agua de pozo	46
6.3.1 Determinación del pH óptimo para la actuación del coagulante	48
7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	52
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

rpm	Revoluciones por minuto
BW	Grupo climático seco desértico
BS	Grupo climático semidesértico
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
Ø	Tamaño de partícula
INE	Instituto Nacional de Ecología
NOM	Norma Oficial Mexicana
NMX	Norma Mexicana
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua
OMS	Organización Mundial de la Salud
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization



ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 2.1	Distribución del proceso de difusión y atracción electrostática (proceso de la doble capa eléctrica)	5
Figura 2.2	Desestabilización del coloide y compresión de la capa difusa	6
Figura 2.3	Equipo para prueba de jarras	10
Figura 2.4	<i>Opuntia albicarpa</i> Scheinvar	11
Figura 5.1	Equipo Portatil Waterproof TN 100 utilizado para la medición de turbidez	27
Figura 5.2	Botellas OxiTop empleadas para la medición de DBO ₅	28
Figura 5.3	Bloque de digestión empleado para la determinación de DQO	29
Figura 5.4	Curva de calibración de la DQO	30

Figura 5.5	Medidor de pH	32
Figura 6.1	DQO y DBO ₅ en agua residual doméstica ensayada con coagulante deshidratado con diferentes tamaños de partícula. S/T: jarra testigo	34
Figura 6.2	DQO y DBO ₅ en agua residual sintética ensayada con coagulante deshidratado con diferentes tamaños de partícula. S/T: jarra testigo	35
Figura 6.3	Turbidez en agua residual doméstica y agua residual sintética después del tratamiento con distintos tamaños de partícula del coagulante. S/T: jarra testigo	35
Figura 6.4	Color en agua residual doméstica y agua residual sintética después del tratamiento con distintos tamaños de partícula del coagulante deshidratado. S/T: jarra testigo	36
Figura 6.5	DQO y DBO ₅ en agua residual doméstica ensayada con diferentes dosis de coagulante deshidratado ($1 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1.25 \text{ mm}$)	37
Figura 6.6	DQO y la DBO ₅ en agua residual sintética ensayada con diferentes dosis de coagulante deshidratado ($1 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1.25 \text{ mm}$)	38
Figura 6.7	Turbidez en agua residual doméstica y agua residual sintética tratada con diferentes dosis de coagulante deshidratado ($1 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1.25 \text{ mm}$)	39

Figura 6.8	DQO y DBO ₅ de agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol en dosis de 150 mg/L, con diferentes tamaños de partícula. S/T: jarra testigo	41
Figura 6.9	DQO y DBO ₅ de agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol en dosis de 250 mg/L, con diferentes tamaños de partícula. S/T: jarra testigo	41
Figura 6.10	Turbidez en agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol a diferentes dosis y con varios tamaños de partícula. S/T: jarra testigo	42
Figura 6.11	DQO y DBO ₅ de agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol a diferentes dosis y un mismo tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$). S/T: jarra testigo	43
Figura 6.12	Turbidez del agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol a diferentes dosis y un mismo tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$). S/T: jarra testigo	43
Figura 6.13	DQO y DBO ₅ de agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado térmicamente agregado en diferentes dosis y con un mismo tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$)	45
Figura 6.14	Turbidez en agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado térmicamente agregado en diferentes dosis y con un mismo tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$)	45

Figura 6.15	Turbidez de una solución de caolín al agregar el coagulante tratado con etanol (Tx. EtOH) y el coagulante tratado térmicamente (Tx. térmico), en dosis de 100 y 150 mg/L. S/T: jarra testigo	47
Figura 6.16	Remoción de turbidez en una solución de caolín con pH 4, 5, 7, y 9 al agregar el coagulante tratado térmicamente con tamaño de partícula $0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$ en dosis de 150 mg/L	49
Figura 6.17	DQO y DBO ₅ en agua residual doméstica con pH corregido, después de agregar coagulante tratado con etanol a diferentes dosis. S/T: jarra testigo	50
Figura 6.18	Turbidez en agua residual doméstica con pH corregido, agregando el coagulante tratado con etanol en dosis de 100, 150 y 200 mg/L con tamaño de partícula $0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$. S/T: jarra testigo	50

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1 Composición química media de los cladodios de <i>Opuntia</i> sp. libres de espinas	14
Tabla 2.2 Composición de ácidos orgánicos de los cladodios de <i>Opuntia</i> sp. en dos diferentes tiempos	15
Tabla 2.3 Contenido de vitaminas en cladodios de <i>Opuntia</i> sp.	16
Tabla 5.1 Composición del agua residual sintética	24
Tabla 5.2 Composición de la solución de oligoelementos	24

RESUMEN

La coagulación-floculación es el proceso por el cual las partículas coloidales del agua se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del medio que las rodea, llamadas flóculos, lo que permite su posterior eliminación por medio de gravedad. Los coagulantes más utilizados generalmente presentan como principal inconveniente su alto costo. El uso de coagulantes naturales es una alternativa promisoría, ya que algunos han demostrado disminuir la turbidez del agua al mismo grado que ciertos productos químicos de alto costo. En este trabajo, se propone el uso de *Opuntia albicarpa* Scheinvar como coagulante para el tratamiento de aguas residuales y de agua de pozo. Las muestras de *Opuntia* sp. se obtuvieron en la región de Zempoala, Hgo. Fueron lavadas, limpiadas, cortadas y secadas 72 h a 70°C. Posteriormente, se molieron con un mortero y un molino eléctrico. El producto obtenido se separó por tamizado utilizando mallas de 2, 1, 0.6 y 0.25 mm. En una primera etapa, se usó el coagulante así obtenido en agua residual doméstica de la red de drenaje de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y en agua residual sintética. Para las pruebas de jarras se utilizó un equipo estándar provisto de 6 unidades de tratamiento simultáneas. En una segunda etapa, se extrajo el color del coagulante por maceración con alcohol etílico durante un periodo de 10 días. Una tercera etapa consistió en dar al coagulante un tratamiento térmico. Las aguas residuales se caracterizaron antes y después del tratamiento en términos de alcalinidad, acidez, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), color, turbidez y pH. Al evaluar diferentes dosis de coagulante con diferente tamaño de partícula los mejores resultados se obtuvieron al emplear 150 mg/L de coagulante con tamaño de partícula, comprendido entre 0.6 mm y 1 mm. Se observó también que el

coagulante obtenido puede ser una alternativa promisorio en la disminución de la turbidez en el proceso de potabilización del agua.

INTRODUCCIÓN

El suministro de agua con características adecuadas para consumo humano es un problema al que no se le ha encontrado una solución total en México. Entre los efectos que causa el agua contaminada en la salud de la población, se han reportado enfermedades tales como cólera, disentería, fiebre tifoidea, hepatitis viral A, rotavirus, fiebre amarilla, diarreas infantiles, salmonelosis, absceso hepático amibiano y amibiasis intestinal. En efecto, una de las principales causas de muerte en todas las entidades federativas del país son las infecciones gastrointestinales.

La contaminación se puede definir como la presencia en el aire, el agua o el suelo de productos que afectan a la salud del hombre, la calidad de vida o el funcionamiento natural de los ecosistemas. Así, la contaminación del agua es la incorporación a esta de materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales y de otros tipos, o de aguas residuales. Estas impurezas varían en tamaño y aproximadamente en seis órdenes de magnitud, desde unos pocos Angstrom para sustancias solubles hasta cientos de micrones para la materia en suspensión, deteriorando la calidad del agua. La eliminación de una gran proporción de estas impurezas se lleva a cabo por sedimentación del agua residual. Sin embargo, debido a que muchas impurezas son demasiado pequeñas para obtener una remoción eficiente por sedimentación basada sólo en la gravedad, es preciso llevar a cabo la eliminación de estas partículas como

agregados de mayor tamaño y más fácilmente decantables, con el fin de obtener una separación satisfactoria por sedimentación; a este proceso se le llama coagulación-floculación.

La búsqueda de alternativas de tratamiento del agua basadas en la utilización de coagulantes naturales en los procesos de clarificación, remoción de metales pesados y otros contaminantes se hace imprescindible, sobre todo si se tiene en cuenta que en nuestro país no se satisface la demanda de agua. Por lo anterior, en este trabajo se pretendió encontrar materiales alternativos y de bajo costo a partir de *Opuntia albicarpa* Scheinvar que puedan ser utilizados como coagulantes y que sustituyan a los materiales convencionales y de alto costo, tales como las sales de hierro y aluminio.

1. MARCO TEÓRICO

2.1 Propiedades generales de los coloides

Las partículas coloidales son partículas discretas que pueden ser agregados de átomos, moléculas o materiales con mayor tamaño que los átomos o moléculas individuales, pero lo suficientemente pequeños como para presentar propiedades distintas a las del medio dispersivo (Sawyer *et al.*, 2000). Su tamaño oscila entre 1 y 0.001 μm , y la mayor parte no es visible, incluso bajo el microscopio óptico convencional.

Cualquier material moderadamente insoluble en el medio de dispersión puede formar una dispersión coloidal. Durante las operaciones de perforación de rocas se forman partículas coloidales en cantidades considerables; también se generan por el desgaste natural de minerales (*i.e.*, óxidos de hierro y silicatos). Así mismo, los microorganismos pueden formar dispersiones coloidales si no están aglutinados o adheridos a un soporte.

El área superficial de los coloides es muy grande con respecto a su masa, al igual que para cualquier sólido finamente dividido. Como resultado de lo anterior, los fenómenos de superficie controlan el comportamiento de las suspensiones coloidales, superando los efectos gravitacionales (Sawyer *et al.*, 2000).

Debido a que las partículas coloidales tienen dimensiones mayores que la longitud de onda promedio de la luz visible, interfieren con su paso. Dado que la luz que incide sobre las partículas es reflejada, un haz de luz que pase a través de una

suspensión coloidal sólo es visible para un observador que esté en ángulo recto al rayo de luz. A este fenómeno se le conoce como efecto Tyndall, y explica por qué las partículas coloidales ocasionan la turbidez del agua (Sawyer *et al.*, 2000). Así, la turbidez es la propiedad óptica de una muestra de agua de diseminar y absorber la luz, en lugar de transmitirla en línea recta.

2.2 Estabilidad de las partículas coloidales

Todas las partículas coloidales tienen carga eléctrica. El signo de esta carga primaria puede ser positivo o negativo, aunque la mayor parte de los coloides de las aguas residuales desarrollan una carga primaria negativa. El signo y magnitud de esta carga primaria es afectada frecuentemente por el pH y la fuerza iónica de la fase acuosa.

Una dispersión coloidal (fase sólida y acuosa juntas) no tiene una carga eléctrica neta. Por tanto, la carga primaria de las partículas debe equilibrarse en la solución acuosa. Esto tiene como resultado una doble capa eléctrica en cada interfase entre un sólido y el agua. Esta doble capa consiste en la partícula cargada y un exceso equivalente de iones de carga opuesta (contra-iones) que se acumulan en el agua cerca de la superficie de la partícula. Estos contraiones son atraídos electrostáticamente hacia esta región interfase (Weber, 1986).

Esta atracción da lugar a un gradiente de concentración, de tal modo que la agitación térmica al azar puede ocasionar que estos iones difundan desde la superficie de la partícula hacia la masa principal de la solución, en donde su concentración es menor. Estos dos procesos competitivos (difusión y atracción electrostática) extienden la carga en el agua sobre una capa difusiva, dentro de la cual la concentración en exceso de los contraiones es mayor en la zona adyacente a la superficie de la partícula y disminuye gradualmente al alejarnos de la interfase sólido-agua. La figura 2.1 muestra estas distribuciones. Cuando la masa

principal de la solución contiene una concentración iónica intensa, la capa difusiva es tan compacta que ocupa un volumen menor y no se extiende tanto en la solución (Weber, 1986).

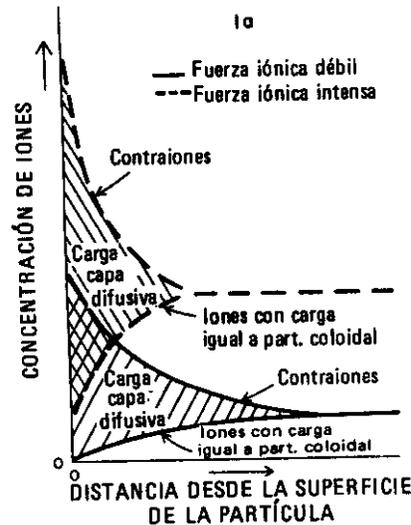


Figura 2.1 Distribución del proceso de difusión y atracción electrostática (proceso de la doble capa eléctrica) (Tomado de Weber, 1986)

2.3 Coagulación-floculación

Algunos coloides son estables indefinidamente y otros no lo son. Los sistemas coloidales estables termodinámicamente se han llamado reversibles, mientras que a los sistemas coloidales inestables se les llama irreversibles (Weber, 1986). En el tratamiento del agua y agua residual, la coagulación corresponde a la agregación de coloides inestables (irreversibles), principalmente por desestabilización y compresión de las dobles capas eléctricas, las cuales se logran por adición de coagulantes químicos. Algunos sistemas coloidales inestables desde el punto de vista termodinámico se agregan lentamente; a estos sistemas se les conoce como

diurnales. Otros sistemas coloidales, llamados caducos, se agregan rápidamente.

Por otra parte, la floculación se refiere a la desestabilización por adsorción de polímeros orgánicos y formación de puentes partícula-polímero-partícula. La capacidad de un polímero para actuar como floculante depende de su afinidad para enlazarse a la superficie de las partículas coloidales (Weber, 1986). La figura 2.2 muestra cómo los coagulantes neutralizan las cargas eléctricas situadas en la superficie del coloide, permitiendo así la aglomeración de las partículas coloidales y formación de los flóculos.

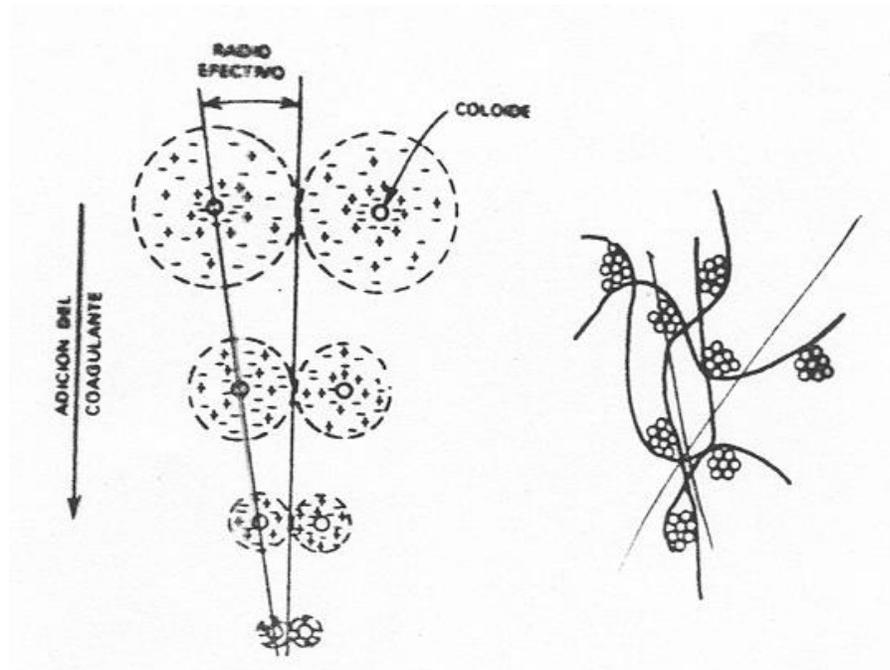


Figura 2.2 Desestabilización del coloide y compresión de la capa difusa
(Tomado de Villaseñor, 2007)

La distinción entre floculación y coagulación puede tener importancia práctica, ya que la agregación coloidal que implica una desestabilización por compresión de la doble capa ocurre a una concentración constante de coagulante, independientemente de la concentración de materia coloidal. En contraste, la agregación coloidal que implica desestabilización por adsorción de polímeros

grandes puede implicar una dependencia lineal (estequiométrica) entre la dosificación óptima de coagulante y la concentración de materia coloidal (Weber, 1986).

Los procesos de coagulación se usan para aumentar la velocidad con que se agregan los sistemas coloidales; es decir, estos procesos transforman un sistema coloidal diuturno en un sistema caduco (Weber, 1986).

Las partículas sólidas de una dispersión coloidal están en movimiento constante y por tanto tienen energía cinética. En cualquier momento existe una distribución de energía cinética, con algunas partículas que tienen una energía cinética suficientemente grande como para vencer la barrera energética de activación. La velocidad de coagulación depende por tanto de la barrera energética y de la energía cinética de las partículas coloidales. Los sistemas coloidales irreversibles que tienen una energía de activación alta y/o una energía cinética baja (coloides diuturnos) coagularán muy lentamente. Los coloides con una energía cinética de activación baja y/o energía cinética alta (sistemas caducos) coagularán rápidamente (Weber, 1986).

Así, se conoce como coagulación–floculación al proceso por el cual las partículas coloidales del agua se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del medio que las rodea, llamadas flóculos. Este proceso remueve sólidos que, debido a su pequeño tamaño, no sedimentan por acción de la gravedad o bien que lo hacen en forma muy lenta. Las aplicaciones de este tratamiento pueden darse cuando: i) el agua residual contiene gran cantidad de compuestos en estado coloidal o suspendido que no son tóxicos; ii) los componentes del agua residual no son biodegradables; iii) los reactivos para el tratamiento se adquieren con precios bajos; iv) se desea garantizar la sedimentación de los sólidos; v) como pretratamiento, con la finalidad de aumentar la eficiencia de los procesos subsecuentes de remoción o por último, vi) cuando los requisitos del efluente justifican el empleo de un proceso primario avanzado (Jiménez-Cisneros, 2002).

El proceso de coagulación-floculación tiene más de 100 años de aplicación y se dejó de emplear en agua residual doméstica en 1930 a favor de los procesos biológicos, debido al elevado costo ocasionado por el tratamiento de la gran cantidad de lodos generados. Actualmente, su aplicación se ha retornado con dos fines: la eliminación del fósforo y la obtención de efluentes de calidad media a costos inferiores a los convencionales (biológicos). Este nuevo auge se debe a la síntesis de nuevos polímeros que permiten emplear bajas dosis de coagulantes y producir menores cantidades de lodos (Jiménez-Cisneros, 2002).

A principio de la década de los setenta, en varios países latinoamericanos se adoptó la tecnología de tratamiento de agua potable para países en vía de desarrollo. (Almendárez, 2004). Estos nuevos procedimientos enfatizaron la necesidad de utilizar coagulantes naturales locales que pudieran disminuir, en parte o en su totalidad, el consumo de reactivos químicos importados. Diferentes coagulantes químicos pueden llevar a cabo la desestabilización de coloides, la cual es la transformación de sistemas diurnales en sistemas caducos, por diferentes caminos. Algunos materiales pueden funcionar como coagulantes o cocoagulantes, y otros coagulantes pueden lograr la desestabilización coloidal por más de un método (Weber, 1986).

2.4 Configuración de los procesos de coagulación-floculación de aguas residuales

La coagulación se emplea frecuentemente para eliminar del agua la turbidez, el color, el olor, patógenos y otros contaminantes. Durante las dos últimas décadas se ha estimulado una considerable investigación sobre este proceso, ya que se ha reconocido el hecho de que otros procesos en el tratamiento del agua residual dependen de una coagulación satisfactoria. Se habla de color aparente del agua si no se ha removido la turbidez y de color verdadero en caso contrario. El color del agua se debe principalmente a la materia orgánica o minerales en suspensión o

en estado coloidal. En general, las sustancias liofílicas son responsables de la coloración del agua (Weber, 1986).

La coagulación-floculación se realiza en dos etapas. En la primera, las fuerzas interpartícula, responsables de la estabilización de los coloides, son reducidas o anuladas por la adición de los reactivos apropiados; en la segunda, las colisiones entre las partículas favorecen la formación de flóculos grandes. En la primera etapa se realiza un mezclado rápido para dispersar el coagulante y favorecer el contacto con agua. En la segunda se efectúa una mezcla lenta, con la finalidad de promover la formación y el aumento de tamaño y/o densidad de los flóculos, los cuales son eliminados del agua por medios físicos como la sedimentación, floculación o filtración (Weber, 1986).

2.4.1 Coagulantes químicos

Los coagulantes más utilizados para el tratamiento de agua y agua residual son las sales de hierro y aluminio. El sulfato de aluminio es una de las sales más comunes utilizadas en el tratamiento de agua con materia orgánica. Por otra parte, una de las características principales de los coagulantes de hierro es su efectividad en un amplio rango de pH y son utilizados generalmente para la remoción de color; sin embargo, son altamente costosos. Los polímeros catiónicos suelen ser utilizados como coagulantes primarios, pero son más utilizados como coadyuvantes para floculación. La elección final de un coagulante y coadyuvante de floculación se basa en su capacidad para remover contaminantes y disminuir la turbiedad del agua al menor costo posible (Villaseñor, 2007).

2.4.2 Prueba de jarras

Para complementar la adición del coagulante se requiere del mezclado, con la finalidad de promover la colisión entre las partículas y destruir la estabilidad del sistema coloidal. El movimiento browniano, es decir el movimiento caótico comunicado a las partículas pequeñas al ser bombardeadas por moléculas individuales de agua, está siempre presente como una fuerza homogeneizadora natural. Sin embargo, casi siempre se requiere energía adicional de mezclado, que distribuya el coagulante y promueva colisiones rápidas. En la coagulación también son importantes la frecuencia y el número de colisiones entre las partículas.

La selección del tipo de coagulante, así como su dosificación, selección de los reactivos y las condiciones de operación apropiadas para cualquier tipo de agua natural o residual deben determinarse experimentalmente en laboratorio mediante la prueba de jarras (Weber, 1986).

Esta prueba consiste en colocar en jarras el agua que se quiere ensayar sobre un floculador de laboratorio con paletas rotativas de velocidad regulable. En cada recipiente se añaden simultáneamente distintas dosis del reactivo elegido, con la finalidad de seleccionar el coagulante y su dosis óptima para tratar el agua en cuestión bajo condiciones estandarizadas.

El equipo para la prueba de jarras (figura 2.3) consiste en 6 unidades de tratamiento simultáneas. Cada una de ellas dispone de un agitador de palas normalizado con regulador de velocidad para el mezclado rápido o lento de las etapas de coagulación y floculación, respectivamente (Villaseñor, 2007).

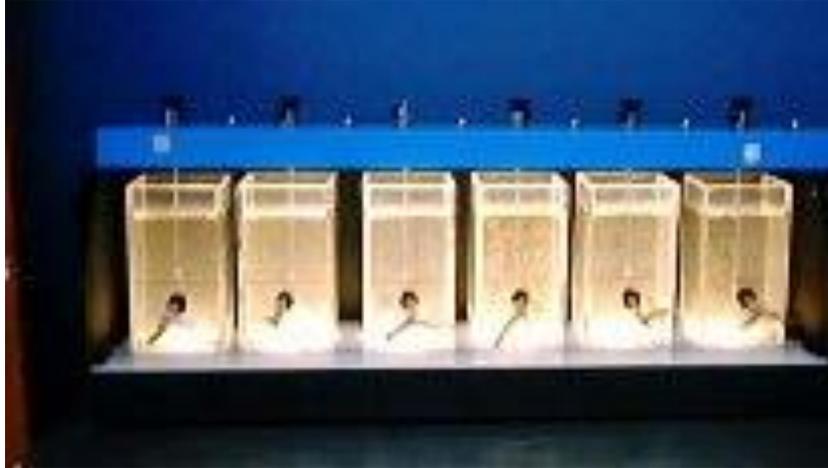


Figura 2.3 Equipo para prueba de jarras

Con este equipo se trata de simular las condiciones óptimas industriales bajo las cuales se producen los procesos de coagulación-floculación, con corrección y sin corrección del pH del agua.

2.5 El género *Opuntia*

El genero *Opuntia* comprende plantas perennes, suculentas, simples o cespitosas, arborescentes, arbustivas o rastreras. El tronco bien definido o con ramas desde la base, erectas, extendidas o postradas. Artículos globosos, claviformes, cilíndricos o aplanados (cladodios), muy carnosos o leñosos. Limbo de hojas pequeño, cilíndrico, carnoso. Aréolas axilareas con espinas, pelos, glóquidas y a veces glandulares; por lo general, las de la parte superior de los artículos son las productoras de flores (INE, 2005)

La flor es hermafrodita hemicíclica con eje largo, de color variable, protandrias por abrir sólo durante 24 horas en el caso de *O. albicarpa* Scheinvar (figura 2.4). El fruto es una baya polispérmica, carnosa, más o menos ovoide, desnuda, espinosa; normalmente jugosa y comestible, considerada un fruto accesorio por desarrollarse de un ovario ínfero (INE, 2005).



Figura 2.4 *Opuntia albicarpa* Scheinvar

El nopal es originario de América y existen 258 especies reconocidas, 100 de las cuales se encuentran en México. Se encuentra en diferentes condiciones extremas ya sea de clima o suelo, se desarrolla mejor en los arenosos calcáreos, poco profundos y de preferencia con pH alcalino. Esta condición puede hacer variar los colores de las flores. En cuanto al clima, de acuerdo con la clasificación de Köppen, se encuentra en las claves BS y BW, que representan los climas árido y semiárido, respectivamente (INE, 2005).

Entre las adaptaciones que presentan estas plantas xerófitas está la succulencia, lo que les permite acumular grandes cantidades de agua en forma muy rápida, durante los breves periodos de humedad. Los cladodios, por su forma, representan los cuerpos más eficientes para evitar la evapotranspiración y conservar la humedad interna (INE, 2005).

2.5.1 Especies principales

El género *Opuntia* presenta 5 subgéneros, 17 series y 104 especies. En nuestro país, se utilizan 24 especies para consumos diversos, quince de ellas como nopal para forraje, seis para tuna: *Opuntia albicarpa* Scheinvar (tuna blanca), *O. megacantha*, *O. robusta*, *O. streptacantha* (tuna cardona), *O. undulafa* y *O. ficus-*

indica; y tres para nopal verdura: *O. ficus-indica*, *O. robusta* y la *Nopalea cochellinifera* (Martínez, 2007).

Las principales especies de tuna cultivadas en México son *O. albicarpa* Scheinvar, *O. ficus-indica*, *O. joconoxtle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*; las que se recolectan en forma natural son *O. hyptiacantha*, *O. leucotricha* y *O. streptacantha* (INE, 2005).

Flores *et al.* (1997) señalan que la principal variedad de tuna cultivada en México es la “Alfajayucan” (*Opuntia albicarpa* Scheinvar), la cual es apreciada por la calidad de sus frutos. *Opuntia albicarpa* Scheinvar es una de las especies que tiene los frutos más gustados y de mayor demanda; se consideran nopales de tuna fina y se les cultiva en cercos o en huertos. Se piensa que *O. albicarpa* Scheinvar es una forma hortícola de *O. megacantha* que se originó en Alfajayucan, Hidalgo (Bravo y Sánchez-Mejorada, 1991).

Algunas de las características principales de *O. albicarpa* Scheinvar se encuentran en el tallo. Las ramas están constituidas por pencas o cladodios con apariencia de cojines ovoides y aplanados, unidos unos a otros, que pueden en conjunto alcanzar hasta 5 m de altura y 4 m de diámetro. Las variedades más usuales desarrollan aproximadamente 1.5 m de altura. El tallo, a diferencia de otras especies de cactáceas, está conformado por tronco y ramas aplanadas que poseen cutícula gruesa de color verde con función fotosintética y de almacenamiento de agua en los tejidos. Habita en las zonas desérticas de América del Sur, en Bolivia, Perú, Norte América y México (FAO, 1998).

2.5.2 Composición general y química de *Opuntia* spp.

La composición de los cladodios varía en función de los factores edáficos, el sitio de cultivo, la temporada y la edad de la planta, entre otros. Por lo tanto, los respectivos contenidos de nutrientes varían tanto entre las especies como en las variedades y no deben tomarse valores absolutos. La media de la composición química de los cladodios de *Opuntia* spp. según reportan diversos autores se muestra en la tabla 2.1 (Stintzing y Reinhold, 2005).

Tabla 2.1 Composición química media de los cladodios de *Opuntia* spp. libres de espinas

	Material seco (g/100 g)	Material fresco (g/100 g)
Agua	-	88-95
Carbohidratos	19-23	1-2
Cenizas	18	1-2
Fibras	4-10	0.5-1
Proteínas	1-4	0.2

(Tomado de Stintzing y Reinhold, 2005)

En cuanto a compuestos de bajo peso molecular, en *Opuntia* spp. se encuentran diversos minerales. El potasio es el principal mineral que compone los cladodios; asciende a alrededor del 60% (166 mg/100 g de peso fresco) seguido del calcio (93 mg/100 g peso fresco), sodio (2 mg /100 g de peso fresco), y hierro (1,6 mg/100 g peso fresco), mientras que el magnesio, zinc y cobre, entre otros, son detectados en muy bajas cantidades. Nuevamente, estos valores deben ser considerados como aproximados, ya que el contenido de minerales varía con las especies, lugar de cultivo y el estado fisiológico de los tejidos de los cladodios.

El contenido de azúcares libres puede llegar a 0.32 g/100 g peso fresco. En otro estudio, la fracción de azúcares fue de 0.64-0.88 g/100 g de producto seco la cual aumenta con el desarrollo; sin embargo, este factor también depende de la especie del cactus. De acuerdo con Nobel *et al.* (1992) la composición media de azúcar del mucílago de *O. ficus indica* es 42% arabinosa, 22% xilosa, 21% galactosa, 8% de ácido galacturónico y 7% ramnosa (Stintzing y Reinhold, 2005).

Entre los ácidos orgánicos presentes en mayor cantidad, en cladodios recién colectados según estudios realizados por Teles *et al.* (1994), se encuentran el ácido málico y el ácido cítrico. En contraste, en cladodios más viejos se reduce la cantidad de estos ácidos, como se observa en la tabla 2.2. Los ácidos que le siguen son el oxálico y el malónico, y aunque se detectaron otros ácidos no pudieron cuantificarse.

Tabla 2.2 Composición de ácidos orgánicos de los cladodios de *Opuntia* sp. en dos diferentes tiempos

	Peso fresco (g/100g)	
	6 a.m.	6 p.m.
Acido oxálico	35	35
Acido málico	985	95
Acido cítrico	178	31
Acido malónico	36	tr
Acido succínico	tr	tr
Acido tartárico	n.c.	tr
Acido fórbico	n.c.	n.c.
Acido piscíndico	n.c.	n.c.
Acido económico	n.c.	n.c.

tr: trazas

n.c.: detectado pero no cuantificado

(Tomado de Stintzing y Reinhold, 2005)

Respecto a los aminoácidos y aminos se reportan 18 compuestos importantes, que son alanina, arginina, asparagina, ácido aspártico, ácido glutámico, glutamina, glicina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenil alanina, serina, treonina, triosina, triptófano y valina.

En cuanto a las vitaminas, carotenoides y clorofilas encontrados en cladodios de *Opuntia* sp., estos se muestran en la tabla 2.3. El total de la clorofila en los cladodios fue reportada como 12.5 mg/100 g de materia fresca, dividiéndose este valor en 9.5 mg de clorofila a y 3 mg de clorofila b (Stintzing y Reinhold, 2005).

Tabla 2.3 Contenido de vitaminas
en cladodios de *Opuntia* sp.

100 g de materia fresca	
Vitamina C	7-22 mg
Niocina	0.46 mg
Riboflavina	0.60 mg
Tiamina	0.14 mg
β -caroteno	11.3-53.5 μ g

(Tomado de Stintzing y Reinhold, 2005)

Entre los compuestos de alto peso molecular podemos encontrar celulosa, ramnosa, hemicelulosa y ácido galacturónico.

2.5.3 Aplicaciones de las Opuntias

En México, el nopal ha sido importante en el desarrollo de las culturas regionales por su uso medicinal, ornamental y alimenticio. En la zona norte de México, el nopal se explota como forraje, mientras en la zona centro se consume principalmente como verdura o fruto. Las especies más importantes como forraje son *O. streptacantha* (L.) (cardón) y *O. leucotricha* (L.) (duraznillo); para consumo

como verdura es importante *O. ficus-indica* (L.) y por la calidad del fruto o tunas destaca *O. albicarpa* Scheinvar (L.) (Granados y Castañeda, 1997).

El aprovechamiento de las propiedades curativas de las plantas es una práctica milenaria que nunca ha dejado de existir. Los aztecas lo usaban con muchos fines medicinales. Para las fiebres bebían el jugo; el mucílago o baba del nopal la utilizaron para curar labios partidos, la pulpa curaba la diarrea, las espinas para la limpieza de infecciones, la fruta era usada para el exceso de bilis. También empleaban las pencas del nopal como apósito caliente para aliviar inflamaciones y la raíz para el tratamiento de hernias, hígado irritado, úlceras estomacales y erisipela (Martínez, 2007). Dada su importancia es parte de nuestro escudo nacional y todavía tiene usos medicinales y alimenticios muy variados.

En varios estudios, principalmente realizados en México, se han demostrado las propiedades medicinales que tiene el nopal. Se les llaman “propiedades medicinales” debido a que ayudan a controlar la enfermedad con mayor facilidad, pero esto no significa que se hable de una curación.

A lo anterior se suman otros productos de la transformación del nopal, tales como, la elaboración de champú, crema y jabón; la obtención de fibra deshidratada y jugo de nopal con propiedades hipoglucemiantes y la extracción de mucílago de nopal, al cual se pretende darle diversos usos (emulsificante, lubricante para perforaciones, adherente en pinturas, recubridor, cosméticos, entre otros.) (Martínez, 2007).

2.6 Uso de coagulantes naturales

En ciertas regiones, el agua utilizada para propósitos de consumo humano presenta un alto nivel de turbidez, que es tratado convencionalmente con productos químicos de alto costo. Por tal motivo, se han investigado técnicas que,

además de facilitar este tratamiento, lo hacen menos costoso, tales como el uso de coagulantes naturales que demuestran disminuir la turbidez del agua al mismo grado de los productos químicos convencionales.

Existe una gran variedad de plantas con propiedades coagulantes, entre las que se encuentran, del género de Capparidaceas, la *Bosnia* y la *Armatocereus*, de la familia de las Cactáceas. Además, dentro de la familia Loganiaceas, encontramos la *Strychnos*; dentro de las Cucurbitáceas se encuentran la *Cucurbita* y en el de las Malvaceas encontramos la *Abelmoschus* e *Hibiscus*, entre otras.

Entre los coagulantes naturales más utilizados están los de origen orgánico que se encuentran en ciertas plantas. *Moringa oleifera* es una especie de árbol proveniente de la India, cuyas semillas son utilizadas para disminuir la turbidez del agua y han sido utilizadas para este proceso desde hace ya varios años. Ciertos estudios con aguas del río Thyolo, en Malawi meridional, demostraron el alto poder coagulante de esta planta al ser comparada con los compuestos convencionales. Así, se le considera una alternativa viable para resolver problemas de turbiedad en agua y aguas residuales, en particular al observar también los beneficios obtenidos con su uso, tales como menor costo y fácil instalación (Sutherland *et al.*, 1994).

Los extractos de las semillas de la planta *M. oleifera* son bastante efectivos en el caso de aguas con alta turbidez. Por tanto, tales extractos se han recomendado como una excelente alternativa para el tratamiento del agua en países en desarrollo. Las investigaciones de Sutherland *et al.* (1994) han arrojado resultados sumamente favorables con *M. oleifera*, cuya eficiencia en la remoción de turbidez se encuentra en niveles mayores a 90%. El coagulante se obtiene al extraer los aceites de las semillas de *M. oleifera*; la masa resultante que contiene las sustancias activas que provocan la coagulación es secada y triturada hasta la obtención de partículas finas. En diversas pruebas con agua de río con turbidez

comprendida entre 270 y 380 NTU y con varias dosis del coagulante (75 a 250 mg/L) se obtuvieron efluentes con una turbidez inferior a 4 NTU.

Por otra parte, Sharma *et al.* (2006) reportan una eficiencia significativa de las semillas de *M. oleifera* como bioadsorbente de metales pesados tales como cadmio y plomo. Estos autores reportaron una remoción de 85% de Cd utilizando 4 g del coagulante para agua con una concentración de 25 µg/mL a pH 6.5. Se concluye que este coagulante es una alternativa viable principalmente por su bajo costo, además de ser un método inofensivo para el medio ambiente.

Otro coagulante natural con características similares a las de *M. oleifera* en lo que respecta a la bioadsorción de metales pesados (principalmente Pb²⁺) es *O. streptacantha*, con una eficiencia de remoción de Pb²⁺ mayor al 94% según investigaciones reportadas por Miretzky *et al.* (2008). La dosis óptima de coagulante, previamente cortado, secado y molido, fue de 2.5 g/L y el pH óptimo del agua fue 5.

Martínez-Ugalde (2007) utilizó *Opuntia sp.* para la remoción de metales pesados, principalmente cadmio. El bioadsorbente se obtiene mediante una técnica de tratamiento térmico y posterior secado y triturado de las muestras, lo cual permite obtener una remoción de Cd²⁺ mayor al 50%, en muestras de agua con pH 4.

Existen también floculantes orgánicos como el alginato de sodio, originado a partir del ácido algínico extraído de algas marinas, que se puede utilizar para mejorar el tratamiento con coagulantes convencionales tales como cloruro de hierro y sulfato de aluminio. Otros floculantes orgánicos son los almidones extraídos de la papa, yuca y extractos de semillas de plantas (Vargas y Romero, 2006).

Así mismo, otros floculantes orgánicos naturales (polisacáridos, taninos, derivados de celulosa) han sido utilizados en el tratamiento de aguas residuales de procesos

industriales específicos, como hidrometalurgia, papel, tenería y textiles, entre otros (Özacar y Sengil, 2003).

2.7. Uso de *Opuntia* spp. como coagulante

En Nicaragua se desarrolla la línea de investigación de coagulantes naturales alternativos desde 1992, la cual se inició con la identificación y clasificación botánica de plantas nativas con propiedades aglutinantes entre las que se encuentra *O. cochinellifera* (Almendárez, 2004).

El Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) en México participó en el proyecto “Agua limpia con energía limpia. Provisión de agua en regiones remotas con suministro de energía solar descentralizada”, auspiciado por la Comisión Europea, en el cual se proponen opciones de suministro de agua potable para comunidades rurales con poblaciones menores a 250 habitantes. El modelo de planta que desarrolló el CIRA consiste en un tren que comprende los procesos de coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección, para el tratamiento del agua de lluvia colectada en un bordo o jagüey utilizando goma de nopal como coagulante primario (Díaz *et al.*, 2000).

En China, la actuación de *Opuntia* como coagulante de macromoléculas naturales en agua sintética y agua residual fue estudiada por Zhang *et al.* (2006), quienes compararon la eficiencia de *Opuntia* con $AlCl_3$, un coagulante comercial de alto costo, obteniendo resultados similares en la mayoría de las pruebas realizadas. Los mejores resultados se obtuvieron en el tratamiento de agua residual, principalmente en la remoción de turbidez, que en ambos casos fue alrededor del 93%. Por lo anterior, se propuso a *Opuntia* como sustituto del $AlCl_3$ en el tratamiento de aguas residuales.

Actualmente, en México se realiza investigación del Nopal Mexicano (*Opuntia ficus- indica*) en la clarificación de suspensiones coloidales y en Cuba se investiga la utilización de diferentes productos naturales en la clarificación de agua para consumo humano (Almendárez, 2004).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

3.1 Planteamiento del problema

Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Eugene, 1986) en América Latina los servicios de abastecimiento y saneamiento de agua son muy deficientes. Por tal motivo, en este proyecto se plantea el uso de un coagulante natural obtenido a partir de *Opuntia albicarpa* Scheinvar en el tratamiento del agua residual que sustituya los coagulantes químicos convencionales y de alto costo.

3.2 Justificación

Se estima que la producción global diaria de aguas residuales es de aproximadamente 1,500 km³. Asumiendo que un litro de aguas residuales contamina 8 litros de agua dulce, la carga mundial de contaminación puede ascender actualmente a 12,000 km³ (UNESCO, 2003). Las poblaciones más

pobres resultan las más afectadas, con un 50% de la población de los países en desarrollo expuesta a fuentes de agua contaminadas.

Por otra parte, las aguas residuales constituyen una importante fuente de agua de riego, ya que en alrededor del 10% del total de las tierras de regadío de los países en desarrollo se utiliza este recurso. Esto beneficia directamente a los agricultores donde el agua es escasa ya que puede mejorar la fertilidad del suelo y reducir la contaminación de las aguas receptoras corriente abajo. Aunque las aguas residuales deberían recibir tratamiento para ser utilizadas como agua de riego, en países de bajos ingresos se usan frecuentemente en forma directa, sin tratar, con los riesgos que ello implica en términos de exposición de trabajadores y consumidores a parásitos bacterianos, virales y nemátodos, así como a contaminantes orgánicos, químicos y de metales pesados. Las cosechas cultivadas con aguas residuales sin tratar no pueden exportarse y su acceso a los mercados locales debería estar restringido (UNESCO, 2003).

Por lo anterior, este trabajo busca contribuir en el proceso de tratamiento del agua, donde la clarificación es una de las etapas más importantes, ya que permite la remoción de materiales en suspensión, tales como arcilla, limo y lodos. Para lograr la clarificación del agua, es necesario la utilización de algún agente coagulante que elimine un porcentaje importante de las partículas en suspensión. Con el propósito de sustituir materiales químicos costosos, se propone el uso de un coagulante de origen orgánico como *O. albicarpa* Scheinvar para el tratamiento de agua residual doméstica y agua de pozo. La presente investigación se dirige al estudio de la eficiencia del *O. albicarpa* Scheinvar para la reducción de turbidez, DQO y DBO₅, principalmente.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Analizar la eficacia de coagulantes naturales obtenidos a partir de *Opuntia albicarpa* Scheinvar en el tratamiento del agua.

4.2. Objetivos específicos

- Obtener coagulantes naturales a partir de *Opuntia albicarpa* Scheinvar
- Evaluar la eficacia de los distintos coagulantes respecto a un agua residual sintética
- Evaluar la eficacia de los distintos coagulantes respecto a aguas residuales domésticas
- Evaluar la eficacia de los distintos coagulantes respecto a un agua de pozo sintética

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Muestras de agua

5.1.1 Agua residual doméstica

Las muestras de agua residual doméstica fueron colectadas en frascos de polipropileno de un litro de capacidad de la red de drenaje de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Se observó que la turbidez en los diferentes lotes no era constante debido a que depende de las condiciones climáticas de la ciudad.

5.1.2 Agua residual sintética

Con la finalidad de trabajar con muestras de agua de calidad más homogénea, se preparó un agua residual sintética con la formulación descrita en las tablas 5.1 y 5.2 (Beun *et al.*, 1998).

5.1 Composición del agua residual sintética	
Solución	Concentración
Etanol	0.40 g/L
NH ₄ Cl	0.16 g/L
K ₂ HPO ₄	0.58 g/L
KH ₂ PO ₄	0.23 g/L
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.09 g/L
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.07 g/L
EDTA	0.02 g/L
Sol. de oligoelementos	1.00 ml/L

5.2 Composición de la solución de Oligoelementos	
Solución de oligoelementos	Concentración (mg/L)
FeCl ₃ ·6H ₂ O	0.150
H ₃ BO ₃	0.015
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.003
KI	0.030
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.012
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.006
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.012
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.015

5.1.3 Agua de pozo sintética

Esta solución se obtuvo al agregar 1.75 g de caolín (Baker) por cada litro de agua obteniendo una turbidez de 223 NTU.

5.2 Material biológico

Las muestras de *Opuntia albicarpa* Scheinvar se colectaron en el municipio de Zempoala, Hidalgo. Primeramente, las pencas se lavaron con agua destilada y se les retiraron las espinas con pinzas de disección. Luego se cortaron en cubos de aproximadamente 4 cm.

5.3 Obtención de los coagulantes

5.3.1 Coagulante deshidratado sin tratamiento previo

Las muestras se secaron a 70°C en estufa de secado (Thermolyne Oven series 9000) durante 72 h. El material seco se molió con ayuda de un mortero de porcelana y posteriormente de un molino eléctrico. El producto obtenido se separó por tamizado en mallas normalizadas de 2, 1, 0.6 y 0.25 mm.

5.3.2 Coagulante tratado con etanol

Se tomaron 10 g de las muestras tratadas según el procedimiento descrito en el apartado 5.3.1 y se colocaron en 50 mL de etanol para extraer la clorofila y otros colorantes por maceración durante 7 días. El resultado de la extracción fue una masa granular de color amarillo pálido que posteriormente fue secada a 70 °C durante 24 h.

5.3.3 Coagulante con tratamiento térmico

Los trozos de *Opuntia* (~4 cm) se pusieron bajo calentamiento con agua destilada aproximadamente durante 15 minutos hasta que se observó el cambio de color de verde brillante a verde olivo. Posteriormente se licuó este material y se secó en la estufa por un periodo de 72 h a 70°C para su deshidratación (Martínez-Ugalde, 2007). El material seco se trituroó con ayuda de un mortero de porcelana y se separó en mallas normalizadas de 2, 1, 0.6 y 0.25 mm.

5.4 Pruebas de jarras

Previamente a las pruebas, se caracterizaron los diferentes lotes de agua a tratar en términos de turbidez, DBO₅, DQO, acidez y alcalinidad.

El volumen de muestra empleado en cada jarra fue de 1 litro. Las muestras se sometieron a una agitación corta y violenta para eliminar interferencias producidas por una sedimentación simple. A continuación, se agregó el coagulante en

diferentes dosis para cada jarra y se agitaron a alta velocidad (100 rpm). El tiempo de mezcla rápida fue de 2 minutos. Posteriormente, se procedió a una agitación suave (40 rpm) durante un tiempo de 30 minutos, para después dejar sedimentar los flóculos formados durante un periodo de 30 minutos. Al finalizar se tomó el sobrenadante para realizar las pruebas necesarias de turbidez, DQO, DBO₅, acidez y alcalinidad. La dosis óptima del coagulante se determina considerando principalmente los valores de turbidez.

5.5 Técnicas analíticas

Las técnicas que se describen a continuación se utilizaron para caracterizar las muestras de agua, antes y después del tratamiento con distintos tipos y dosis de coagulante.

5.5.1 Determinación de turbidez

La figura 5.3 muestra el equipo utilizado para la determinación de turbidez. Se utilizó un equipo portátil Waterproof TN 100 adecuado para un rango de turbidez de 0-1000 NTU.



Figura 5.1 Equipo Portatil Waterproof TN 100 utilizado para la medición de turbidez

5.5.2 Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno es un indicador de la contaminación de un efluente, expresada por el consumo de oxígeno disuelto por parte de los microorganismos que descomponen la materia orgánica presente en el propio efluente. Las pruebas de DBO constituyen un índice general cualitativo del contenido de materia orgánica presente en la muestra “que es susceptible de sufrir oxidación biológica” en un corto periodo de tiempo.

En la figura 5.1 se muestra el sistema OxiTop (WTW Measurements Systems, Alemania) que se utilizó para esta medición, el cual registra la DBO₅ de modo automático durante 5 días (APHA, 1989). Dicho sistema utiliza botellas cerradas, en las que la despresurización provocada por el consumo de oxígeno relacionado

a la biodegradación de la materia orgánica es registrada por sensores electrónicos piezoresistivos. En función de su carga orgánica, se coloca un volumen determinado de agua residual en la botella (22.7-432 mL). Los valores de DBO_5 (0-4000 mg/L) se obtienen al multiplicar las lecturas diarias por un factor que depende del volumen de ensayo.



Figura 5.2 Botellas OxiTop empleadas para la medición de DBO_5

5.5.3 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica e inorgánica de una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (Calderón, 1997).

La DQO debe ser mayor que su correspondiente DBO, debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por vía biológica. El ensayo debe realizarse a temperaturas elevadas, para facilitar la oxidación de ciertas clases de compuestos orgánicos, y en presencia de un catalizador (IBAL, 2008).

Para la determinación de la demanda química de oxígeno se utilizó el micrométodo 5220 D de la EPA (APHA, 1989). A 2.5 mL de muestra, se agregaron 1.5 mL de solución digestora (10.216 g de $K_2Cr_2O_7$ y 33.3 g de $HgSO_4$ por litro) y 3.5 mL de solución de sulfato de plata (10.142 g de Ag_2SO_4 en un litro de H_2SO_4). Las muestras se llevaron a digestión dentro de un bloque de calentamiento (COD Reactor 45600, Hach Co., E.U.A; Figura 5.2) a $150^\circ C$ durante 2 horas. Una vez finalizada la digestión de las muestras, éstas se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se leyó su absorbancia a 600 nm. Los valores de DQO se obtuvieron a partir de una curva de calibración (figura 5.3) realizada con biftalato de potasio (0-600 mg/L, equivalentes a 0-705 mg DQO/L).



Figura 5.3 Bloque de digestión empleado para la determinación de DQO

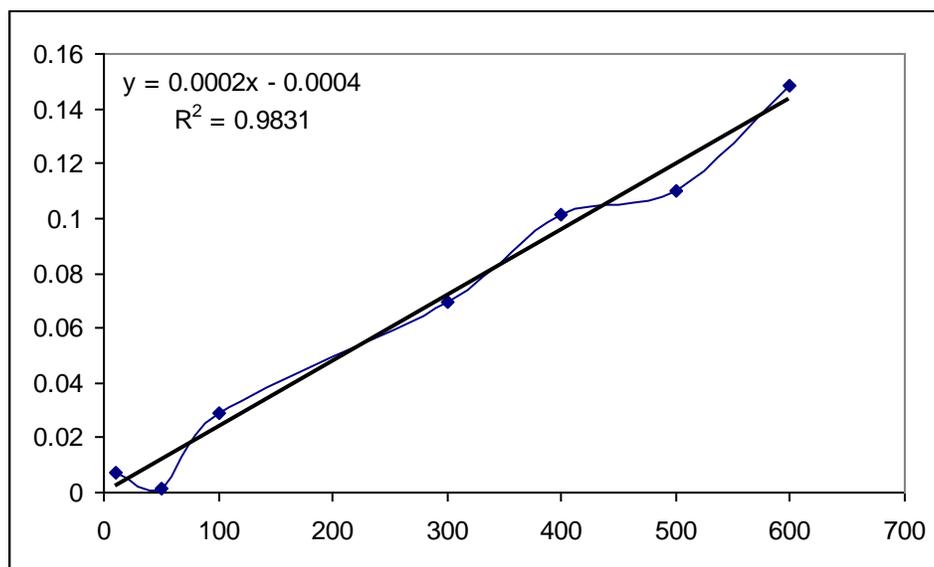


Figura 5.4 Curva de calibración de la DQO

5.5.4 Determinación de acidez y alcalinidad

Los análisis de acidez y alcalinidad se realizaron de acuerdo a la NMX-AA-036-SCFI-2001, que establece el método de prueba para la determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Este método está basado en la medición de la acidez o alcalinidad en el agua por medio de una valoración de la muestra empleando como disolución valorante un álcali o un ácido, según sea el caso.

Las muestras utilizadas para estas pruebas fueron de 100 mL, que se colocaron en matraces Erlenmeyer de 250 mL. Para la prueba de acidez se adicionaron 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína (5.0 g de fenolftaleína en 500 mL de etanol más 500 mL de agua) en agitación constante. Las muestras se titularon con disolución de hidróxido de sodio 0.02 N hasta el vire del indicador (de incoloro a rosa).

Para la prueba de alcalinidad se colocaron de igual manera muestras de 100 mL en matraces Erlenmeyer de 250 mL, y se adicionaron 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína. Las muestras se titularon con la disolución valorada de H₂SO₄ 0.02 N, hasta el vire de la fenolftaleína (de rosa a incoloro). Luego se adicionaron 2 gotas de la disolución indicadora de naranja de metilo (0.5 g del colorante naranja de metilo en 1 L de agua) y se continuó la titulación hasta alcanzar el vire del naranja de metilo (de amarillo a canela).

Finalmente, se calcularon la acidez y alcalinidad tomando en cuenta los volúmenes gastados de solución valorada según las siguientes formulas:

$$\text{Acidez total como CaCO}_3 \text{ en mg /L} = \frac{[(A \times B) - (C \times D)] (50) (1\ 000)}{100}$$

Donde:

100 es el volumen de la muestra en mL

A es el volumen de NaOH utilizado al vire de la fenolftaleína

B es la normalidad de la disolución de NaOH

C son los mL de H₂SO₄ utilizados en el tratamiento con peróxido

D es la normalidad del H₂SO₄ utilizado

50 es el factor para convertir eq/L a mg CaCO₃/L

1 000 es el factor para convertir mL a L

$$\text{Alcalinidad total como CaCO}_3 \text{ en mg /L} = \frac{AXN (50)(1\ 000)}{100}$$

Donde:

A es el volumen total gastado de ácido en la titulación al vire del anaranjado de metilo en mL

N es la normalidad de la disolución de ácido

100 es el volumen de la muestra en mL

50 es el factor para convertir eq/L a mg CaCO₃/L

1 000 es el factor para convertir mL a L

5.5.5 Determinación del pH

Para la determinación del pH se utilizó un medidor de mesa [Hanna Instruments, México) para pH /mV /°C] cuyo rango de medición va de -2 a +16 pH y un electrodo de vidrio rellenable.



5.5 Medidor de pH

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización de las muestras de agua

En primer lugar, se caracterizaron las muestras de agua residual tomadas de la red de drenaje de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) cuyo rango de turbidez varió entre 25 y 328 NTU; para la DQO se obtuvieron valores comprendidos entre 335 y 1088 mg/L y la DBO₅ se mantuvo entre 230 y 380 mg/L.

Estos mismos parámetros se midieron previamente para el agua residual sintética cuyos valores de turbidez variaron entre 40 y 89 NTU, la DQO se mantuvo entre 443 y 763 mg/L y la DBO₅, entre 420 y 510 mg/L.

El agua de pozo sintética mantuvo valores de turbidez entre 233 y 270 NTU.

6.2 Selección de la dosis y método de obtención del coagulante para el tratamiento de aguas residuales

Se determinó el mejor método de preparación del coagulante con respecto a su eficiencia, principalmente en función del grado de remoción de DBO₅, DQO y turbidez.

6.2.1 Pruebas de jarras con el coagulante deshidratado sin tratamiento previo

En estas pruebas, se utilizó el coagulante preparado según lo descrito en la sección 5.3.1. Las pruebas se llevaron a cabo en 3 muestras de 1 L de agua residual doméstica y 3 muestras de agua residual sintética (1 L) preparada según se describe en la sección 5.1. Se añadió el coagulante con dos diferentes tamaños de partícula ($\emptyset \leq 0.25$ mm y 0.60 mm $\leq \emptyset \leq 1$ mm), pero a la misma dosis (250 mg/L).

Una de las muestras de cada tipo de agua residual no recibió dosis alguna de coagulante; esta jarra “testigo” sirvió como referencia para evaluar la eficiencia del tratamiento. Los parámetros estudiados fueron DQO, DBO₅, acidez, alcalinidad, pH y turbidez. Estas pruebas de jarras fueron las únicas que contaron con análisis de color, los cuales se llevaron a cabo en el laboratorio de la Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales del Estado de Hidalgo según el

procedimiento de la NMX-AA-045-SCFI-2001, para la determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

En las figuras 6.1 y 6.2 podemos observar que la DQO y la DBO₅ se incrementaron, tanto en el agua residual doméstica como en la sintética, después de ser tratada con el coagulante. Se notó también que a menor tamaño de partícula del coagulante se obtienen mayores valores de DQO y DBO₅, lo que indica que el coagulante finamente dividido aporta materia orgánica soluble, para el caso del agua residual doméstica.

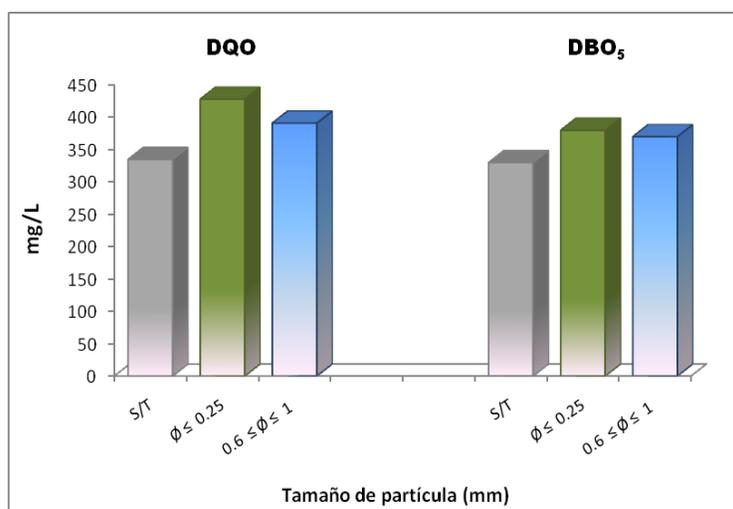


Figura 6.1 DQO y DBO₅ en agua residual doméstica ensayada con coagulante deshidratado con diferentes tamaños de partícula. S/T: jarra testigo

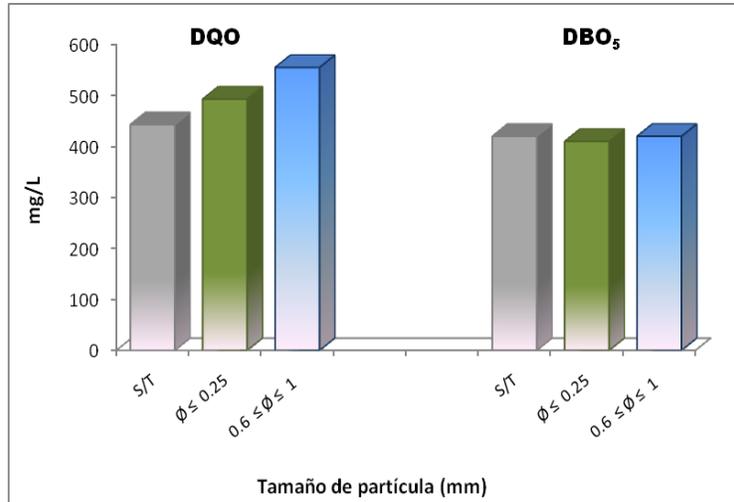


Figura 6.2 DQO y DBO₅ en agua residual sintética ensayada con coagulante deshidratado con diferentes tamaños de partícula. S/T: jarra testigo

La figura 6.3 muestra que también se incrementó la turbidez en el agua residual doméstica luego de la adición del coagulante. Así mismo, la turbidez aumentó más después de agregar el coagulante con menor tamaño de partícula. Sólo en el agua residual sintética hubo una cierta disminución de turbidez (~14%) al añadir el coagulante con mayor tamaño de partícula.

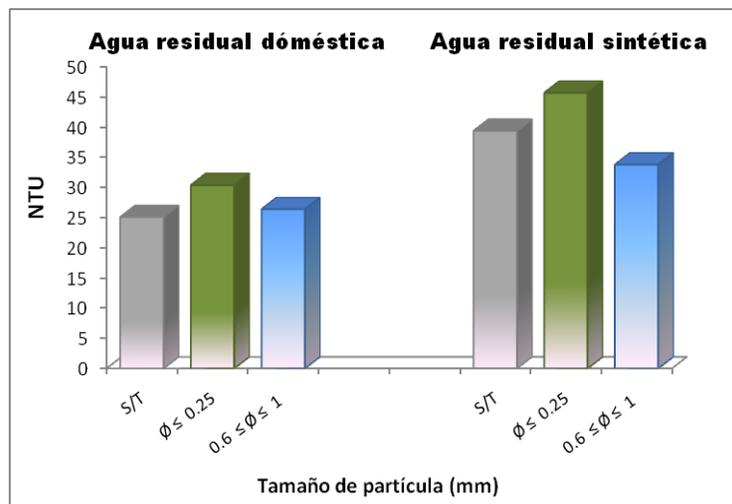


Figura 6.3 Turbidez en agua residual doméstica y agua residual sintética después del tratamiento con distintos tamaños de partícula del coagulante. S/T: jarra testigo

En la figura 6.4 se observa que el color de ambos tipos de agua se incrementó al disminuir el tamaño de partícula del coagulante añadido. Para el coagulante con menor tamaño de partícula ($0.25 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 0.6 \text{ mm}$), el incremento de color fue de 128% y 50%, y en el caso del coagulante con mayor tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$), el incremento fue de 71% y 75% en agua residual doméstica y en agua residual sintética, respectivamente. En cuanto a la determinación de pH, se pudo observar que este parámetro sólo se modificó en décimas de unidad al añadir el coagulante. En el agua residual doméstica disminuyó de 8.25 a 8.02 y en el agua residual sintética aumentó de 5.97 a 6.10.

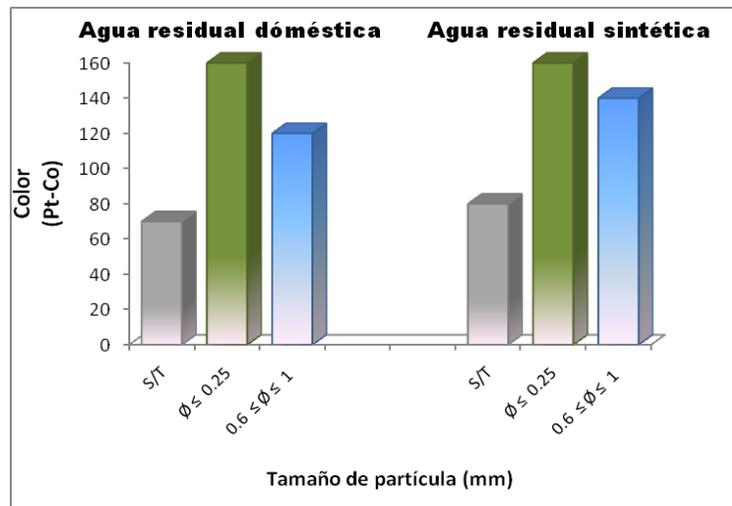


Figura 6.4 Color en agua residual doméstica y agua residual sintética después del tratamiento con distintos tamaños de partícula del coagulante deshidratado. S/T: jarra testigo

En las pruebas de acidez y alcalinidad se notó, en el caso del agua residual doméstica, que el incremento del tamaño de partícula del coagulante provoca que aumenten ambos parámetros. Se presentó un pequeño incremento de 2.4% en cuanto a la alcalinidad, y un aumento considerable de hasta 300% en cuanto a acidez. En el caso del agua residual sintética estos parámetros fueron incongruentes en todas las repeticiones de la prueba, ya que se obtuvieron resultados variados para cada caso que no permitieron distinguir una tendencia determinada.

Los resultados observados en esta etapa, sugieren que el coagulante deshidratado con los tamaños de partícula estudiados aportan color, turbidez, DQO y DBO₅ al agua, y que no deberían utilizarse si lo que se pretende es disminuir estos parámetros en aguas residuales.

Por tal motivo, se decidió utilizar en la siguiente serie de pruebas de jarras un coagulante con mayor tamaño de partícula ($1 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1.25 \text{ mm}$), que tentativamente contribuyera a la remoción de turbidez, DQO y DBO₅. El coagulante se añadió en dosis de 100, 150 y 200 mg/L en cada una de las jarras y se conservó una jarra como testigo.

Nuevamente, la adición del coagulante aumentó las concentraciones de DQO y DBO₅ de las aguas residuales, y en mayor medida conforme aumentó la dosis añadida (figura 6.5). En el caso del agua residual sintética (figura 6.6), la adición de las diferentes dosis de coagulante no pareció afectar considerablemente la DBO₅ de las muestras, por el contrario se observa que al añadir el coagulante en dosis de 150 mg/L hay una disminución de turbidez del 9%.

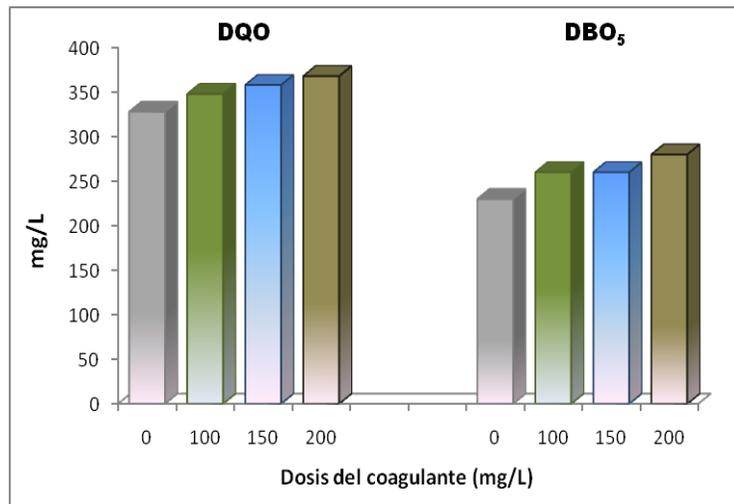


Figura 6.5 DQO y DBO₅ en agua residual doméstica ensayada con diferentes dosis de coagulante deshidratado ($1 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1.25 \text{ mm}$)

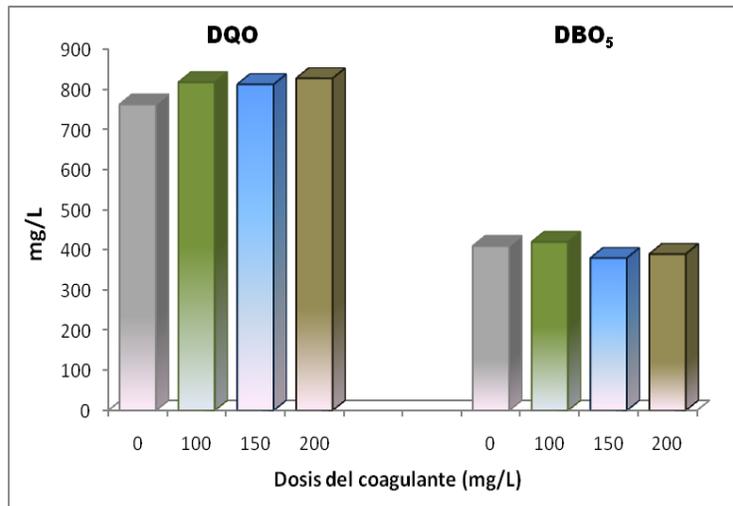


Figura 6.6 DQO y la DBO₅ en agua residual sintética ensayada con diferentes dosis de coagulante deshidratado ($1 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1.25 \text{ mm}$)

En cuanto a la disminución de turbidez, los resultados se observan en la figura 6.7. En el agua residual doméstica todas las dosis agregadas provocaron un incremento en la turbidez; sin embargo, la menor y mayor dosis del coagulante lo hacen con mayor intensidad. Lo anterior es contrario a lo que sucede en el agua residual sintética, donde se observa una pequeña remoción de turbidez con todas las dosis estudiadas. Las remociones más significativas se dan al agregar el coagulante en dosis de 100 y 200 mg/L, cuya eficiencia es de 10 y 15.9%, respectivamente.

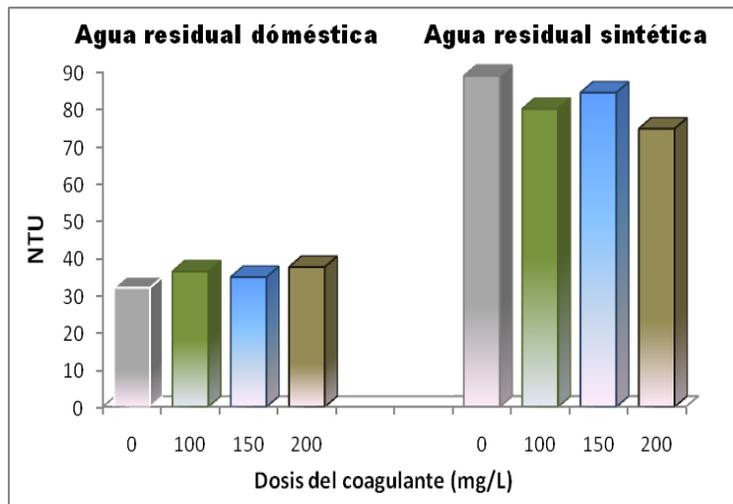


Figura 6.7 Turbidez en agua residual doméstica y agua residual sintética ensayada con diferentes dosis de coagulante deshidratado ($1 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1.25 \text{ mm}$)

Al igual que en la serie anterior de pruebas, el pH se modificó muy poco luego de la adición del coagulante. Por otra parte, los resultados de las pruebas de alcalinidad mostraron que ésta disminuye, principalmente al agregar la menor dosis de coagulante (100 mg/L), con la cual se redujo en 46.3%. Por el contrario, los valores de acidez mostraron un incremento de hasta 41% al aumentar la dosis del coagulante a 200 mg. Nuevamente, estos parámetros fueron inconsistentes en el agua residual sintética, por lo que no fueron tomados en cuenta.

Cabe mencionar que aunque en esta etapa no hubo medición de color, el aumento de este parámetro fue muy notorio, ya que al aumentar la dosis del coagulante el agua adquiría una coloración verde cada vez más intensa. Por este motivo, y por lo indicado por los resultados de turbidez, DQO y DBO₅, se establece que algunas de las sustancias contenidas en el coagulante son solubles en agua, lo cual aumenta la concentración de materia orgánica y el color. Por otro lado, se constató la inestabilidad del agua residual sintética, la cual pudo deberse a que no se encontraba en condiciones estériles y se propiciaba el crecimiento de microorganismos durante su preparación y almacenamiento. Debido a lo anterior, se decidió no utilizarla en pruebas posteriores.

Según investigaciones realizadas por Almedárez (2004) con *Opuntia cochinellifera* para la obtención de un coagulante natural para la remoción de color y turbidez, se requiere la extracción con etanol de los pigmentos verdosos. El material gelatinoso obtenido a partir de *O. cochinellifera* se utilizó como coagulante natural primario en agua de lago, y se comparó su eficiencia con coagulantes químicos como sulfato de aluminio, cloruro férrico y el polímero sintético Quimifloc. Se reporta que *Opuntia cochinellifera* puede remover hasta 63% (pH sin corrección) y 91% de turbidez (para pH corregido).

Por tal motivo, en la siguiente etapa se decidió extraer la clorofila y otros colorantes de *Opuntia albicarpa* Scheinvar por medio de maceración del coagulante deshidratado con etanol.

6.2.2 Pruebas de jarras con el coagulante tratado con etanol

Se trató el agua residual doméstica con el coagulante preparado según lo descrito en el apartado 5.3.2. Se probaron diferentes tamaños de partícula ($0.25 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 0.6 \text{ mm}$, $0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$ y $1 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1.25 \text{ mm}$), y se variaron las dosis de coagulante (150 y 250 mg/L).

En la figura 6.8 se observa que el tamaño de partícula adecuado para reducir la DQO fue el comprendido entre 0.6 mm y 1 mm, con el que se obtuvo un 40% de remoción y sólo un 14% de aumento en DBO_5 en una dosis de 150 mg/L. Tanto el menor como el mayor tamaño de partícula ($0.25 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 0.6 \text{ mm}$ y $1 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1.25 \text{ mm}$ respectivamente) agregaron materia orgánica al agua.

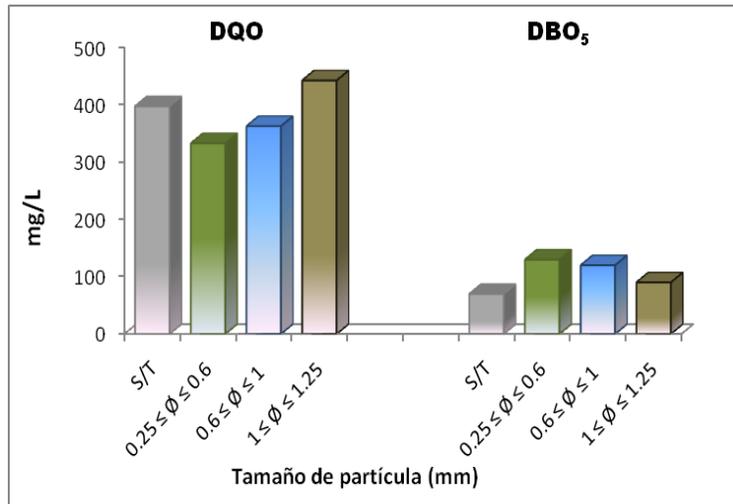


Figura 6.8 DQO y DBO₅ de agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol en dosis de 150 mg/L, con diferentes tamaños de partícula. S/T: jarra testigo

En la figura 6.9 se muestran los resultados obtenidos al aumentar la dosis del coagulante a 250 mg/L. La DQO y la DBO₅ aumentaron al incrementarse el tamaño de partícula del coagulante. Sin embargo, mientras la DQO removida disminuye conforme aumenta el tamaño de partícula, la DBO₅ muestra una tendencia contraria.

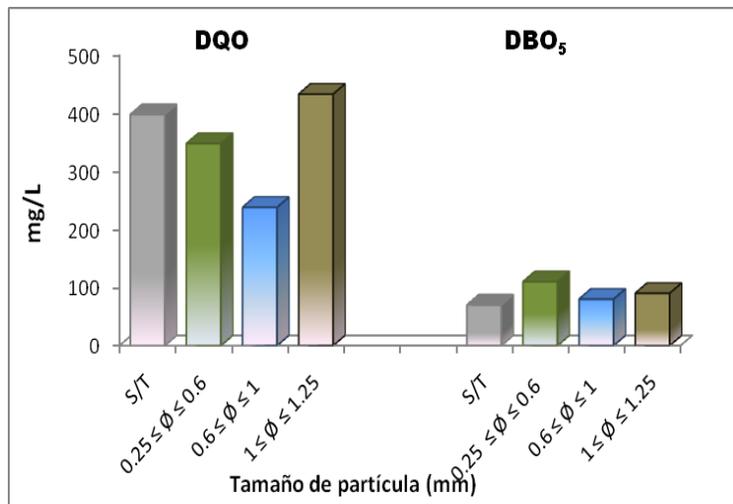


Figura 6.9 DQO y DBO₅ de agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol en dosis de 250 mg/L, con diferentes tamaños de partícula. S/T: jarra testigo

En la figura 6.10 se compara el grado de disminución de turbidez al agregar diferentes dosis de coagulante con varios tamaños de partícula. A menor dosis de coagulante (150 mg/L) existe una mayor disminución, en particular si se utiliza un tamaño de partícula intermedio ($0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$), el cual logró remover el 61% de turbidez. En el caso de la mayor dosis de coagulante (250 mg/L), observamos claramente cómo aumentó la turbidez (más del 27%) al agregar el coagulante de menor tamaño ($0.25 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 0.6 \text{ mm}$). Para estas dosis, la mayor eficiencia se alcanzó con el coagulante de tamaño intermedio de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$), que logró disminuir el 29% de turbidez.

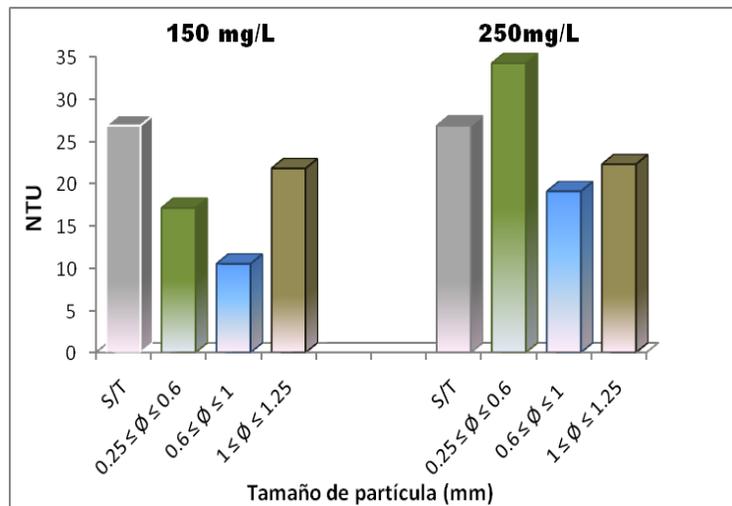


Figura 6.10 Turbidez en agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol a diferentes dosis y con varios tamaños de partícula. S/T: jarra testigo.

De acuerdo con los resultados anteriores, el coagulante natural tratado con etanol puede ser una alternativa viable para la remoción de materia orgánica si se utiliza un tamaño de partícula comprendido entre 0.6 mm y 1 mm. Por lo tanto, las siguientes pruebas buscaron determinar la dosificación de este coagulante. Se varió la concentración de coagulante (100-200 mg/L) manteniendo fijo el tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$). Los resultados de estas pruebas se muestran en las figuras 6.11 y 6.12, donde se observa que la dosis que proporciona mejores resultados es la de 150 mg/L, que remueve el 33% de DQO, 27% de DBO_5 y 58%

de turbidez. Por el contrario, al agregar una dosis más alta de coagulante (200 mg), la DQO aumenta en un 5%, apenas el 3% de DBO₅ es removida y el efecto sobre la eliminación de turbidez es sólo de 33%

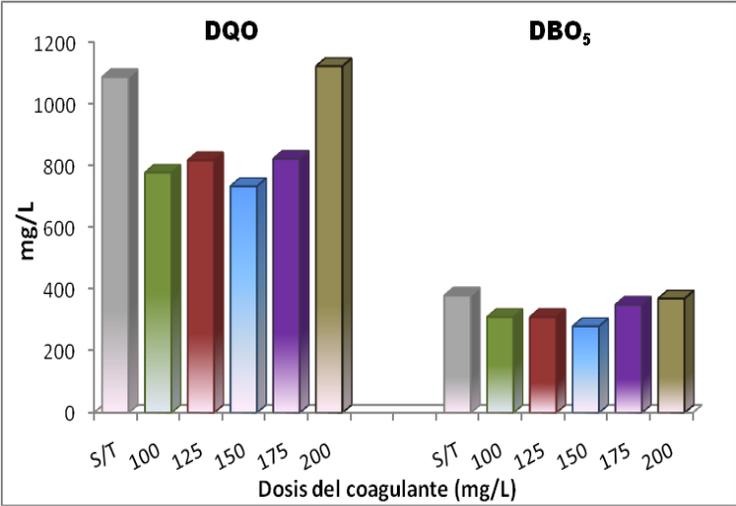


Figura 6.11 DQO y DBO₅ de agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol a diferentes dosis y un mismo tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1 \text{ mm}$). S/T: jarra testigo

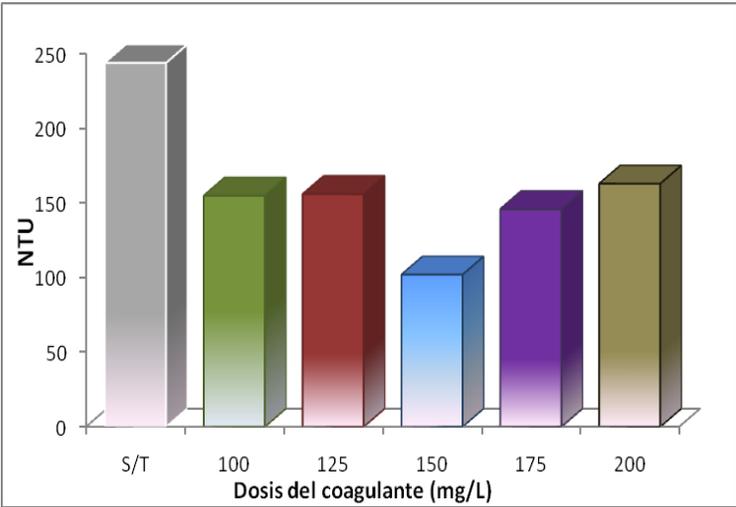


Figura 6.12 Turbidez del agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado con etanol a diferentes dosis y un mismo tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1 \text{ mm}$). S/T: jarra testigo

Los resultados observados en esta etapa, indican que este coagulante tratado con etanol puede ser una buena alternativa para la depuración de agua residual doméstica, ya que permitió alcanzar una remoción de turbidez superior al 50%. Se establece también que el tamaño de partícula adecuado para este coagulante es el que se encuentra entre 0.6 mm y 1 mm, y su dosis óptima es 150 mg/L.

Según estudios realizados por Martínez-Ugalde (2007), el uso de *Opuntia sp.* como bioadsorbente natural de cadmio (Cd^{2+}) puede ser una alternativa viable. El autor plantea como método de preparación del coagulante un tratamiento térmico, que en su caso remueve el 53.3% de Cd^{2+} , por lo que lo prefiere a otros métodos, como el tratamiento por deshidratación, que sigue la ruta de tratamiento descrita en el apartado 5.3.1, o la protonación que consiste en poner en contacto las muestras de *Opuntia sp.* con H_2SO_4 durante 24 h, para posteriormente secarlos y triturarlos hasta obtener el tamaño de partícula deseado.

Considerando lo anterior, se probó el coagulante preparado según Martínez-Ugalde (2007) en términos de remoción de turbidez, DQO y DBO_5 .

6.2.3 Pruebas de jarras con el coagulante tratado térmicamente

El material tratado como se indica en el apartado 5.3.3 se utilizó en dosis de 100 y 150 mg/L, debido a que en la etapa anterior fueron éstas las dosis que mostraron mejores resultados. Las pruebas se llevaron a cabo en agua residual doméstica.

En la figura 6.13 se observa que tanto la DQO y DBO_5 aumentaron al agregar el coagulante. En contraste, el coagulante tratado térmicamente permitió remover la turbidez de las muestras, como se observa en la figura 6.14. Aunque la diferencia entre los valores de remoción es muy pequeña, se obtiene una eficiencia de 68% con la mayor dosis de coagulante (150 mg/L).

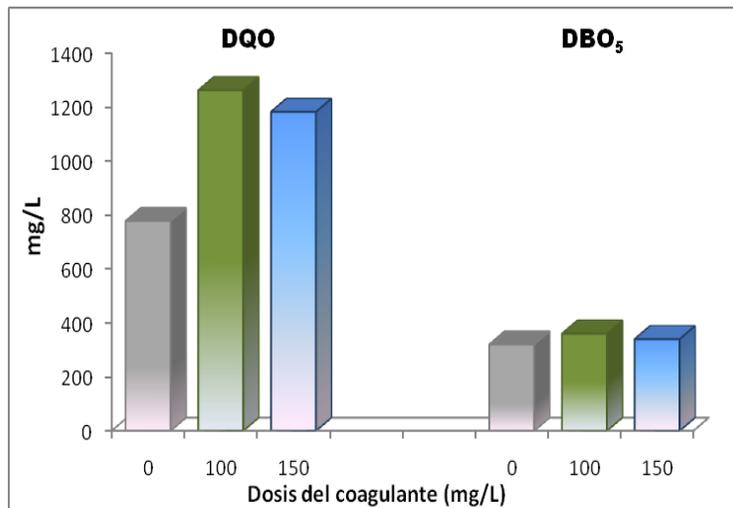


Figura 6.13 DQO y DBO₅ de agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado térmicamente agregado en diferentes dosis y con un mismo tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1 \text{ mm}$)

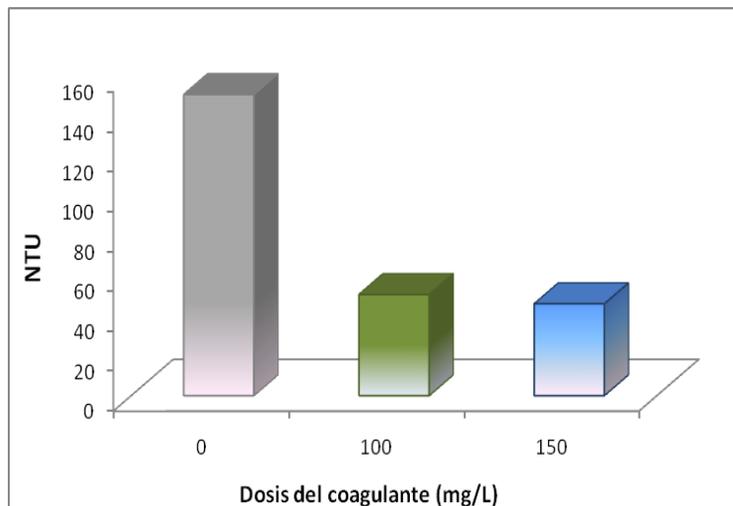


Figura 6.14 Turbidez en agua residual doméstica ensayada con el coagulante tratado térmicamente agregado en diferentes dosis y con un mismo tamaño de partícula ($0.6 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1 \text{ mm}$)

En cuanto a los resultados de pH, las modificaciones al agregar el coagulante no fueron muy notorias. La jarra “testigo” mantuvo un pH de 8.04 que se modificó a 8.1 y 7.91 al agregar las dosis de 100 y 150 mg/L, respectivamente. Se observó también que la alcalinidad disminuye hasta 2.3% conforme aumenta la dosis del coagulante. La acidez disminuye de la misma forma, hasta en un 32%.

Respecto al color, cabe mencionar que por primera vez no se observaron cambios aparentes después de añadir el coagulante. Esto puede deberse al cambio que experimenta la clorofila contenida en el coagulante, que al ser sometida a calentamiento se transforma en feofitina luego del reemplazo del ión Mg^{2+} del anillo tetrapirrólico de la clorofila por dos iones hidrógeno. Por otra parte, los ácidos presentes en el tejido vegetal pueden actuar como catalizadores de la degradación de los pigmentos (Migliorisi *et al.*, 1999).

Debido a los resultados anteriores, podemos mencionar que aunque el coagulante tratado térmicamente removió el 69.5% de turbidez, no puede ser una alternativa viable para el tratamiento de agua residual doméstica cuando lo que se pretende es disminuir los contaminantes orgánicos, ya que agrega en gran medida DQO y DBO_5 . Sin embargo, el coagulante tratado térmicamente puede ser una posibilidad en el tratamiento de agua de pozo destinada a consumo humano. Por lo tanto, la siguiente serie de pruebas consistió en simular los contaminantes inorgánicos coloidales característicos del agua de pozo utilizando una solución de caolín.

6.3 Selección de la dosis y método de preparación del coagulante para el tratamiento de agua de pozo

Se probaron los coagulantes tratados térmicamente y con etanol en una solución de caolín con turbidez de 223 NTU, que se obtuvo según el apartado 5.1.3. El tamaño de partícula utilizado fue $0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$ debido a su efectividad en

pruebas anteriores, y las dosis ensayadas fueron de 100 y 150 mg/L. La eficiencia de los coagulantes se muestra en la figura 6.15.

Los coagulantes presentan una eficiencia mayor al agregar una dosis de 150 mg/L. En el caso del coagulante tratado térmicamente, la remoción de turbidez es de 55%, mientras que el coagulante tratado con etanol permitió remover un 75%.

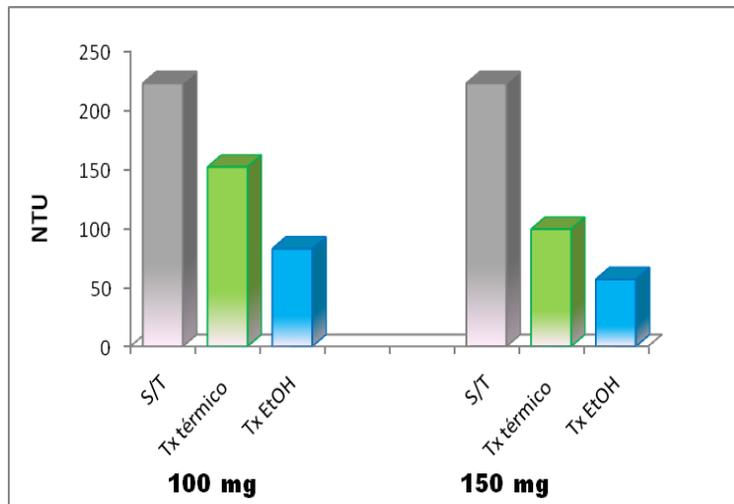


Figura 6.15 Turbidez de una solución de caolín al agregar el coagulante tratado con etanol (Tx. EtOH) y el coagulante tratado térmicamente (Tx. térmico), en dosis de 100 y 150 mg/L. S/T: jarra testigo

Los resultados anteriores muestran que el mejor coagulante para el tratamiento tanto de agua de pozo como de agua residual doméstica es el coagulante tratado con etanol, y que debería añadirse a razón de 150 mg/L.

Sin embargo, según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, que establece los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, la turbidez máxima permitida para uso y consumo humano no debe exceder de 5 NTU. Debido a lo anterior, aunque los valores obtenidos en la prueba de jarras con agua de pozo no permiten cumplir con los límites permisibles establecidos, la optimización del tratamiento puede llegar a ser una alternativa viable para la potabilización de agua.

Estudios realizados por Zimmerman *et al* (2008) muestran la eficiencia de *Opuntia* spp. como coagulante natural en la purificación de agua potable, valorando principalmente el grado de remoción de turbidez en muestras de agua sintéticas elaboradas a base de caolín a un pH inicial de 10 y turbidez de 0 a 375 NTU. El tratamiento del coagulante consistió básicamente en secar y triturar las muestras con ayuda de un molino para café y su posterior separación en mallas normalizadas. El tamaño de partícula utilizado osciló entre 0.8 mm y 1 mm. La dosis óptima de coagulante dependió del grado de turbidez de las muestras, observándose que para muestras de baja turbidez la dosis óptima se encuentra entre 5 y 15 mg/L, mientras que para muestras con mediana y alta turbidez la dosis óptima osciló entre 15 y 35 mg/L y entre 35 y 55 mg/L, respectivamente. Se observó que después de las pruebas de jarras la remoción de turbidez fue alrededor de 98%. Posteriormente, las propiedades de *Opuntia* spp. fueron comparadas con las de *M. oleifera*, uno de los coagulantes naturales más utilizados por sus altas propiedades coagulantes, y se obtuvo una remoción de ~99% bajo las mismas condiciones. Según el autor, las sustancias activas de *Opuntia* spp. pueden ser polímeros naturales como la celulosa y la hemicelulosa, entre otros y que el mecanismo de acción puede deberse a la formación de puentes entre ellos.

6.3.1 Determinación del pH óptimo para la actuación del coagulante

Para determinar el pH óptimo al cual se obtiene la mayor remoción de turbidez, se realizaron pruebas de jarras en un intervalo de pH de 4 a 9. El pH fue ajustado utilizando soluciones de NaOH y H₂SO₄ 1M. El coagulante fue adicionado en dosis de 150 mg/L. La solución de caolín utilizada contenía 270 NTU. Los porcentajes de turbidez alcanzados después de la adición del coagulante se muestran en la figura 6.16.

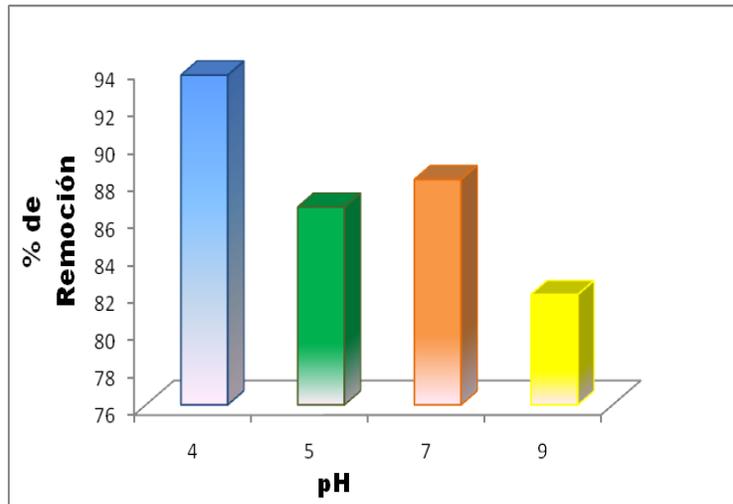


Figura 6.16 Remoción de turbidez en una solución de caolín con pH 4, 5, 7, y 9 al agregar el coagulante tratado térmicamente con tamaño de partícula $0.6 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 1 \text{ mm}$ en dosis de 150 mg/L

La corrección del pH es un factor importante para el tratamiento del agua, principalmente en la etapa de clarificación. Después de los resultados observados se corrigió el pH del agua residual doméstica para comparar la actuación del coagulante bajo estas condiciones. La figura 6.17 presenta la remoción de DQO y DBO₅ a pH 4. Estos parámetros aumentan al agregar el coagulante en dosis de 200 mg, pero disminuyen al agregar dosis de 100 y 150 mg/L. La mayor remoción se obtiene con la dosis intermedia (150 mg/L) cuya remoción de DQO y DBO₅ es de 51 y 56%, respectivamente.

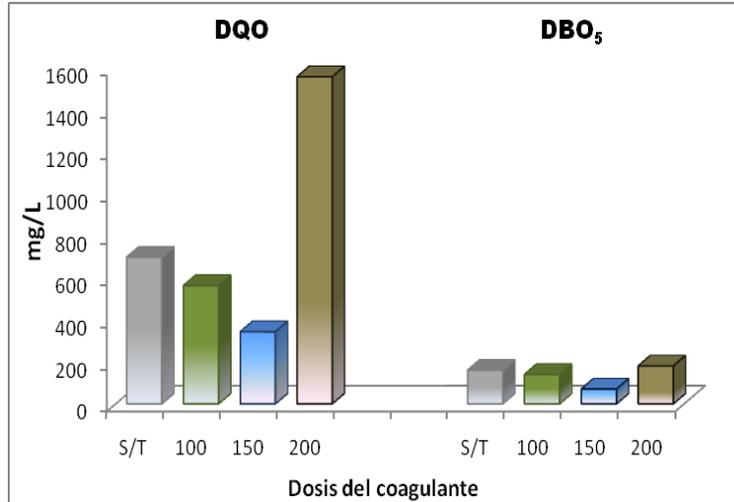


Figura 6.17 DQO y DBO₅ en agua residual doméstica con pH corregido (4) al agregar el coagulante tratado con etanol a diferentes dosis. S/T: jarra testigo

En cuanto a la disminución de turbidez de aguas residuales domésticas, observamos en la figura 6.18 que las tres dosis probadas de coagulante actúan eficientemente; sin embargo, los mejores resultados se obtuvieron al agregar la dosis de 150 mg/L, cuyo porcentaje de remoción fue de 75%. Las dosis de 100 mg/L y 200 mg/L también fueron eficientes, pero sólo se observaron disminuciones del 60 y 65% de este parámetro, respectivamente.

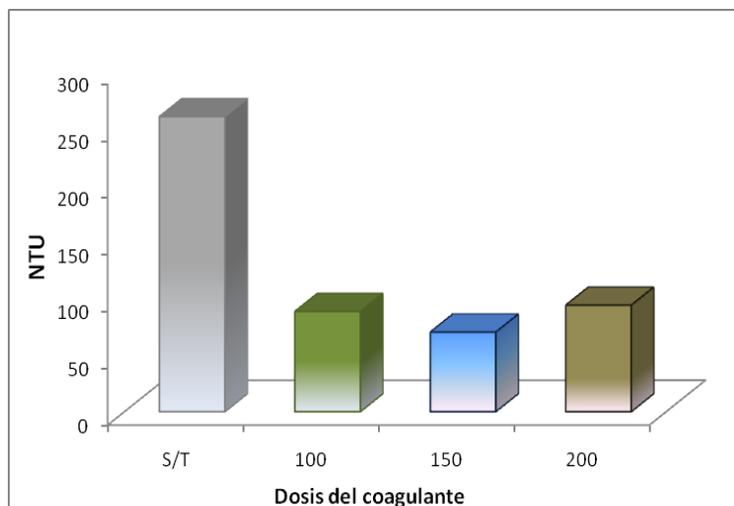


Figura 6.18 Turbidez final en agua residual doméstica con pH corregido (4), agregando el coagulante tratado con etanol en dosis de 100, 150 y 200 mg/L con tamaño de partícula $0.6 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 1 \text{ mm}$. S/T: jarra testigo

Según los resultados anteriores y de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales van de 75 a 150 mg/L, lo cual indica que el agua residual doméstica tratada podría ser utilizada principalmente para riego agrícola agregando dosis de coagulante de 150 mg/L.

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Se encontró que *Opuntia albicarpa* Scheinvar puede ser utilizada con éxito como coagulante en procesos de potabilización de agua. El pH, el tamaño de partícula, el tratamiento y la concentración del coagulante fueron parámetros determinantes en la eliminación de turbidez, DBO₅ y DQO. La utilización de un tamaño de partícula menor o una concentración mayor pueden causar el incremento de dichos parámetros (turbidez, DBO₅ y DQO) debido a que el coagulante contiene sustancias solubles en agua que incrementan principalmente la concentración de materia orgánica. Así mismo, un pH básico causa el incremento de color en el agua, por lo que la corrección del pH durante la etapa de clarificación en el tratamiento de aguas es un factor importante.

En cuanto a los métodos de preparación del coagulante para la remoción de turbidez, DQO y DBO₅, el tratamiento con etanol de *Opuntia albicarpa* Scheinvar fue el que presentó la mejor eficiencia tanto en agua residual doméstica como en agua de pozo. Se logró una disminución de turbidez superior al 50% en el primer caso y del 98% en el segundo, por lo que puede ser una buena alternativa para la depuración de agua.

La mayor efectividad del coagulante en agua residual doméstica se encontró a pH 4, obteniéndose una disminución de turbidez de 75%, el tamaño de partícula más adecuado estuvo comprendido entre 0.6 mm y 1 mm, y la concentración que permite mejores resultados es de 150 mg/L según las pruebas de jarras llevadas a cabo. El procedimiento de obtención de este coagulante natural resulta sencillo y tiene un bajo costo comparado con los coagulantes y floculantes comerciales empleados para el tratamiento de aguas. Así, puede utilizarse durante un tratamiento primario de aguas residuales, como coadyuvante de la sedimentación, o incluso como tratamiento único de coagulación-floculación.

Una de las principales perspectivas de este trabajo es la comparación de *O. albicarpa* Scheinver con otras especies.

8. REFERENCIAS

- Almendárez N. (2004) Comprobación de la Efectividad del Coagulante (*Cochifloc*) en aguas del Lago de Managua "Piedras Azules". *Rev. Iberoam. Polím.* 5(1): 46-54.
- APHA (1989) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17th Edition. American Public Health Association, Washington D.C.
- Beun J.J., Hendricks A., van Loosdrecht M.C.M., Morgenroth E., Wilderer P.A., Heijnen J.J. (1998). Aerobic granulation in a sequencing batch reactor. *Water Res.* 33(10): 2283-2290.
- Bravo H. y Sánchez-Mejorada H. (1991) Las cactáceas de México. Vol. II. Universidad Nacional Autónoma de México, México, p. 404.
- Calderón F. (1997) Métodos de Análisis [en línea]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Disponible en: http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Indice_de_Metodos.htm [accesado el 20 de junio de 2008].
- Díaz D.C., García P.D. y Solís M.C. (2000) Abastecimiento de agua potable para pequeñas comunidades rurales por medio de un sistema de colección de lluvia-planta potabilizadora. *Ciencia Ergo Sum* 7(2): 129- 134.
- Eugene F. (1986) Agua y Salud Humana. Editorial Limusa-OMS, México.
- FAO (1998) Especies Arbóreas y Arbustivas para las Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org/regional/LAmerica/redes/sisag/arboles/default.htm> [accesado el 1 de julio de 2008].
- Flores V., Ramírez M., De Luna E.J. y Ponce J. (1997) Diagnóstico y programa de desarrollo del sistema producto tuna. SAGAR-UACH-CIESTAAM, Chapingo, México. pp. 5-49.
- Granados S.D., y Castañeda A.D. P. (1997) El Nopal. Editorial Trillas. México, pp 11-19.

-
- IBAL (2008) Aguas Residuales [en línea] Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado. Disponible en: <http://www.ibal.gov.co/ibal/index.htm> [accesado el 27 de junio de 2008].
- INE (2005) Nopal Tunero: Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. Instituto Nacional de Ecología, México.
- Jiménez-Cisneros B.E. (2002) Contaminación Ambiental en México, Causas, Efectos y Tecnología. Editorial Limusa, México.
- Martínez R. F. (2007) Catálogo de propiedades nutrimentales, nutracéuticas y medicinales del nopal tunero. Secretaría de Desarrollo Rural del Estado de Puebla.
- Martínez-Ugalde I. (2007) Remoción de Cadmio en solución acuosa utilizando como bioadsorbente a *Opuntia* spp. Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Pachuca, México.
- Migliorisi L.S., Montiel G.M., Sgroppo S.C., Avanza J.R. (1999) Degradación Térmica de Clorofila en Puré de Pimientos Verdes. Laboratorio de Tecnología Química FACENA, UNNE, Argentina.
- Miretzky P., Muñoz C., Carrillo-Chávez A. (2008) Experimental binding of lead to a low cost on biosorbent: Nopal (*Opuntia streptacantha*). *Biores. Technol.* 99(5) pp. 1211-1217
- NMX-AA-036-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Secretaria.
- NMX-AA-045-SCFI-2001 Análisis de agua – Determinación de Color (Pt-Co) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- NOM-001-SEMARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-127-SSA1-1994 Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

-
- Nobel P.S., Cavalier J. y Andrade J.L. (1992) Mucilage in cacti: Its apoplastic capacitance associated solutes, and influence on tissue water relations. *J. Exp. Botany*. 43: 641 –648.
- Özacar M. y Sengil A. (2003) Evaluation of tannin biopolymer as a coagulantaid for coagulation of colloidal particles. *Colloids and Surfaces. A. Physicochem. Eng. Aspects* 229: 85-96.
- Sawyer C.N., Mc Carthy P.L., Parkin G.F. (2000) Conceptos Básicos de Química coloidal. En: *Química para Ingeniería Ambiental*, 4ª edición. Editorial Mc Graw Hill, Bogotá.
- Sharma P., Kumari P., Sriveastava M.M.S. (2006) Removal of cadmium aqueous system by shelled *Moringa oleifera* Lam. seed power. *Biores. Technol.* 97: 299-305.
- Stintzing F.C. y Reinhold C. (2005) Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Mol. Nutr. Food Res.* 49: 175-194
- Sutherland J.P., Folkard G.K., Mtawali M.A. y Grant W.D. (1994) *Moringa oleifera* as a natural coagulant. Proceedings of the 20th WEDC Conference “Affordable water supply and Sanation”, Colombo, Sri Lanka, pp. 297-299
- Teles F.F.F., Price R.L., Whiting F.M., Reid B.L. (1994) Circadian variation of non-volatile organic acids in the prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.). *Rev. Ceres*, 41: 614–622.
- UNESCO (2003) Agua para todos, agua para la vida. Informe de las Naciones Unidas para el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, París. Francia.
- Vargas C.M. y Romero E.L.G. (2006) Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. *Tecnol. Marcha* 19(4): 37-41.
- Villaseñor C. J. (2007) Procesos de Depuración de Aguas Residuales [en línea]. Universidad de Castilla-La Mancha. Disponible en: <http://www.uclm.es/profesorado/jvillasenor/esp/pdar/jartest.pdf> [accesado el 30 de junio de 2008].
-

-
- Weber W.J. (1986) Coagulación y Floculación. En: Control de la calidad del agua
Procesos fisicoquímicos. Editorial Reverte, Madrid, pp 64-91.
- Zhang J., Zhang F., Luo Y. y Yang H. (2006) A preliminary study on cactus as
coagulant in water treatment. *Process Biochem.* 41: 730-733.
- Zimmerman J.B., Miller S.M., Fugate E.J., Oyandel C.V. y Smith J.A. (2008)
Toward Understanding the Efficacy and Mechanism of *Opuntia* spp. as a
Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment. *Environ. Sci.*
Technol. 42(12): 4274-4279.