



**“USO DE MATERIALES NATURALES PARA MEJORAR
LA COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN Y LA VELOCIDAD DE
SEDIMENTACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DE
AGUAS MUNICIPALES Y AGRÍCOLAS”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
E INGENIERÍA AMBIENTALES**

PRESENTA:

I.Q.I. GUSTAVO ADOLFO MARTÍNEZ PÉREZ

ASESORA:

DRA. ICELA DAGMAR BARCELÓ QUINTAL

MÉXICO, D.F. ABRIL DE 2015

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

AGRADECIMIENTOS

A la red PROMEP por el financiamiento del proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Al Área de Química y Fisicoquímica Ambiental de la UAM Azcapotzalco, y en especial a la Dra. Icela D. Barceló Quintal por su valioso apoyo y dirección a este trabajo de tesis.

A la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UAM-A, por las facilidades y atenciones brindadas durante la fase experimental de este proyecto.

Al ININ, con ayuda del Dr. Pedro Ávila por las facilidades otorgadas para poder realizar pruebas en esa Institución.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

A mis padres, por haberme brindado todo su cariño, apoyo y respaldo en esta etapa, por ser personas en quien siempre he podido confiar y por haberme ayudado a no perder de vista mis metas.

A Natán, por haber compartido grandes e inolvidables momentos, por enseñarme a ser responsable, y por estar juntos sin importar la situación.

A mis amigos Diana, Eduardo y Cobby, por estar presentes una vez más en esta etapa de mi vida; a Manuel, Gaby, Yon y Danny por haberme apoyado a lo largo de la realización de este proyecto y por amenizar los días de trabajo; a Yoss por haber mostrado ser una amiga en quien puedo confiar y con quien puedo contar en todo momento. A Marlene por haberme apoyado y ayudarme a no perder de vista la meta de este proyecto.

A mi directora de tesis, Dra. Icela Dagmar Barceló Q., sin quien este trabajo no sería posible, por su tiempo, determinación y muy valioso apoyo.

Índice

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
2. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN	5
2.1 HIPÓTESIS	5
2.2 OBJETIVO GENERAL	5
2.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2.3 JUSTIFICACIÓN	6
3. ESTADO DEL ARTE	7
3.1 Coagulantes	7
3.1.1 Coagulantes sintéticos	7
3.1.1.1 Sulfato de Aluminio	8
3.1.1.2 Cloruro de Polialuminio	8
3.1.1.3 Cloruro Férrico	9
3.1.1.4 Sulfatos Férrico y Ferroso	9
3.2 Problemática del uso de coagulantes con contenido de Aluminio y Hierro	10
3.3 Coagulantes naturales	11
3.3.1 <i>Moringa oleifera</i>	12
3.3.2 Quitosano	18
3.4 Aplicación de los lodos producidos	23
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
4.1 Tratamiento de aguas residuales	25
4.1.1 Tratamiento primario	27
4.1.2 Tratamiento secundario	27
4.1.3 Tratamiento terciario	28
4.2 Coagulación – Floculación	29
4.2.1 Turbidez	32
4.2.2 Color	33
4.2.3 Coloides: clasificación y propiedades	34
4.2.4 Mediciones electrocinéticas	37
4.2.5 Potencial Zeta	39
4.2.6 Mecanismos de coagulación	41
4.2.6.1 Coagulación por neutralización de cargas	41

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

4.2.6.2	Coagulación por Compresión de la Doble Capa.....	42
4.2.6.3	Coagulación por Puente Químico.....	43
4.2.6.4	Coagulación por barrido.....	44
4.2.7	Diagramas de coagulación.....	45
4.3	Coagulantes.....	46
4.3.1	Coagulantes más utilizados	47
4.3.2	Coagulantes naturales	48
4.3.2.1	Moringa Oleífera	48
4.3.2.2	Quitina y Quitosano.....	50
4.4	Determinación de la dosis óptima mediante prueba de jarras.	51
5.	METODOLOGÍA.....	53
5.1	Muestreo y caracterización del agua.....	53
5.2	Metodología para la preparación de coagulante de Sulfato de Aluminio	56
5.3	Metodología para la preparación de coagulante de semillas de <i>Moringa oleífera</i> 56	
5.4	Metodología para la síntesis de quitosano a partir de cáscara de camarón.....	57
5.5	Metodología para la determinación de acidez superficial	58
5.6	Prueba de jarras.....	58
5.6.1	Metodología de la prueba de jarras para la determinación de la dosis óptima 59	
5.6.2	Metodología para la determinación de la influencia del pH en la coagulación 60	
5.7	Determinación del potencial Zeta y tamaño de partícula de cada coagulante	60
5.8	Determinación de los grupos funcionales que integran la estructura molecular del Quitosano por Espectroscopía IR	61
5.9	Análisis de la superficie por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	62
5.10	Difracción de Fluorescencia de Rayos X.....	63
6.	RESULTADOS	65
6.1	Caracterización del Agua Residual.....	65
6.2	Determinación de la acidez superficial	65
6.2.1	Sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$	66
6.2.2	Coagulante extraído de semillas de moringa.....	70
6.2.3	Quitosano sintetizado a partir de cáscara de camarón.....	74
6.3	Determinación de metales en las semillas de <i>Moringa oleífera</i>	78
6.4	Caracterización de quitosano	78
6.4.1	Caracterización del Quitosano con IR	78
6.4.2	Caracterización del Quitosano con Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) 81	

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

6.4.3	Fluorescencia de Rayos X	84
6.5	Determinación de la dosis óptima con pruebas de jarras	87
6.5.1	Pruebas con dosis de 0-300 mg/L.....	87
6.5.1.1	Sulfato de aluminio.....	87
6.5.1.2	Moringa oleífera	89
6.5.1.3	Quitosano	92
6.5.1.4	Comparación del rendimiento de coagulantes con dosis 0-300 mg/L... 93	
6.5.2	Pruebas con dosis de 0-100 mg/L.....	94
6.5.2.1	Sulfato de aluminio.....	94
6.5.2.2	Moringa oleífera	96
6.5.2.3	Quitosano	97
6.5.2.4	Comparación del rendimiento de los coagulantes con dosis 0-100 mg/L. 98	
6.5.2.5	Mezcla de coagulantes Moringa:Quitosano.....	99
6.5.2.5.1	Moringa:Quitosano 50:50.....	100
6.5.2.5.2	Moringa:Quitosano 75:25.....	101
6.5.2.5.3	Moringa:Quitosano 25:75.....	103
6.5.2.5.4	Comparación del rendimiento de las mezclas de coagulantes	104
6.5.2.6	Comparación del rendimiento de los coagulantes individualmente y de las mezclas.....	105
6.5.3	Pruebas con dosis de 100-200 mg/L.....	107
6.5.3.1	Sulfato de aluminio.....	107
6.5.3.2	Moringa oleífera	108
6.5.3.3	Quitosano	110
6.5.3.4	Comparación del rendimiento de los coagulantes con dosis 100-200 mg/L. 111	
6.5.3.5	Mezcla de Coagulantes Moringa:Quitosano.....	112
6.5.3.5.1	Moringa:Quitosano 50:50.....	112
6.5.3.5.2	Moringa:Quitosano 75:25.....	114
6.5.3.5.3	Moringa:Quitosano 25:75.....	115
6.5.3.5.4	Comparación del rendimiento de las mezclas de coagulantes	116
6.5.3.6	Comparación del rendimiento de los coagulantes individualmente y sus mezclas 117	
6.5.4	Dosis óptimas de cada coagulante y de sus mezclas.....	118
6.6	Determinación de condiciones de mezcla rápida y lenta	119
6.7	Determinación del pH óptimo	121
6.7.1	Sulfato de aluminio.....	121
6.7.2	Moringa.....	122

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

6.7.3	Quitosano	124
6.7.4	Mezcla M:Q 50:50.....	125
6.7.5	Mezcla M:Q 75:25.....	127
6.7.6	Mezcla M:Q 25:75.....	128
6.7.7	pH óptimo para cada coagulante.....	129
6.8	Determinación del Potencial Zeta de los coagulantes	130
6.8.1	Agua residual.....	130
6.8.2	Sulfato de aluminio.....	131
6.8.3	Moringa.....	132
6.8.4	Quitosano	133
6.8.5	M:Q 50:50	135
6.8.6	M:Q 75:25	136
6.8.7	M:Q 25:75	137
7	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y COROLARIO.....	138
	Conclusiones.....	138
	Recomendaciones.....	140
	Corolario.....	140
8.	APENDICES	141
A.1	APÉNDICE A: Tablas de resultados de acidez superficial.....	141
A.2	APÉNDICE B: Curvas de calibración de Absorción atómica.....	147
A.3	APÉNDICE C: Tablas de resultados de Pruebas de Jarras – Dosis óptima.....	149
A.4	APÉNDICE D: Tablas de resultados de Pruebas de Jarras – pH óptimo.....	165
9.	REFERENCIAS	168

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Ejemplos de tratamientos primarios.....	27
Tabla 4.2 Ejemplos de tratamientos secundarios.	28
Tabla 4.3 Ejemplos de tratamientos terciarios o avanzados.	28
Tabla 4.4 Características de las sustancias productoras de color en el agua.	34
Tabla 4.5 Propiedades de los coloides.	35
Tabla 4.6 Clases de Coagulación.....	44
Tabla 5.1 Parámetros e instrumentos que se utilizaron para la medición en campo.....	53
Tabla 5.2 Parámetros, instrumentos y métodos que se emplearon para los análisis en laboratorio.	54
Tabla 5.3 Instrumentos que fueron utilizados para la caracterización de la materia prima y en las pruebas de coagulantes.....	55
Tabla 5.4 Parámetros preliminares para evaluar los coloides propuestos en este proyecto.	55
Tabla 5.5 Combinaciones propuestas para las pruebas con mezclas de coagulantes.....	56
Tabla 6.1 Caracterización del agua residual.....	65
Tabla 6.2 Datos de la titulación del Sulfato de Aluminio con KOH.....	66
Tabla 6.3 Datos de la titulación del Sulfato de Aluminio – KNO ₃ con KOH.	68
Tabla 6.4 Datos de la titulación del coagulante de semillas de moringa.	70
Tabla 6.5 Datos de la titulación del coagulante de semilla de moringa - KNO ₃ con KOH..	72
Tabla 6.6 Datos de la titulación de quitosano sintetizado con KOH.....	74
Tabla 6.7 Datos de la titulación de quitosano sintetizado - KNO ₃ con KOH.....	76
Tabla 6.8 Metales determinados en las semillas de moringa.....	78
Tabla 6.9 Componentes de las diferentes variedades de quitosano comerciales de diferente viscosidad.....	86
Tabla 6.10 Resultado de la prueba de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 0-300).....	88
Tabla 6.11 Resultados de la prueba de jarras con moringa con extracción con NaCl (Dosis 0-300).....	89
Tabla 6.12 Resultados de la prueba de jarras con moringa con extracción simple (Dosis 0-300).....	90
Tabla 6.13 Resultados de la prueba de jarras con quitosano (Dosis 0-300).	92
Tabla 6.14 Resultados de la prueba de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 0-100).	94
Tabla 6.15 Resultados de las pruebas de jarras con coagulante de moringa, con extracción simple.	96
Tabla 6.16 Resultados de las pruebas de jarras con quitosano.....	97
Tabla 6.17 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 50:50.....	100
Tabla 6.18 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 75:25.....	101
Tabla 6.19 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 25:75.....	103
Tabla 6.20 Resultados de las pruebas de jarras con sulfato de aluminio con dosis de 100-200 mg/L.....	107

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 6.21 Resultados de las pruebas de jarras con coagulante de moringa con dosis de 100-200 mg/L.....	108
Tabla 6.22 Resultados de las pruebas de jarras con coagulante de moringa con dosis de 100-200 mg/L.....	110
Tabla 6.23 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 50:50.....	112
Tabla 6.24 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 75:25.....	114
Tabla 6.25 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 25:75.....	115
Tabla 6.26 Resultados de las pruebas de dosis óptima con los diferentes coagulantes.	119
Tabla 6.27 Resultados de las pruebas para velocidades y tiempos de las diferentes etapas del proceso.....	121
Tabla 6.28 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 100 mg/L.....	121
Tabla 6.29 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 200 mg/L.....	123
Tabla 6.30 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 180 mg/L.....	124
Tabla 6.31 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 20 mg/L.....	125
Tabla 6.32 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 20 mg/L.....	127
Tabla 6.33 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 200 mg/L.....	128
Tabla 6.34 Valores de pH óptimo para cada coagulante.	129
Tabla 6.35 Composición del sedimento y material particulado del agua de la presa José Antonio Alzate, Edo. de México (Tomado de Barceló, 2000).....	130
Tabla 8.1 Datos de la determinación de acidez superficial del Sulfato de Aluminio con KOH.	141
Tabla 8.2 Datos de la determinación de acidez superficial del Sulfato de Aluminio – KNO ₃ (electrolito soporte), con KOH.	142
Tabla 8.3 Datos de la determinación de acidez superficial del coagulante de semillas de moringa con KOH.....	143
Tabla 8.4 Datos de la determinación de acidez superficial del coagulante de semillas de moringa – KNO ₃ (electrolito soporte), con KOH.....	144
Tabla 8.5 Datos de la determinación de acidez superficial del quitosano sintetizado con KOH.	145
Tabla 8.6 Datos de la determinación de acidez superficial del quitosano sintetizado – KNO ₃ (electrolito soporte), con KOH.	146
Tabla 8.7 Pruebas de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 0-300).....	149
Tabla 8.8 Pruebas de jarras con semillas de moringa - NaCl (Dosis 0-300).....	150
Tabla 8.9 Pruebas de jarras con semillas de moringa – Agua desionizada (Dosis 0-300).....	151
Tabla 8.10 Pruebas de jarras con quitosano sintetizado (Dosis 0-300).....	152
Tabla 8.11 Pruebas de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 0-100).....	153
Tabla 8.12 Pruebas de jarras con moringa – agua desionizada (Dosis 0-100).....	154
Tabla 8.13 Pruebas de jarras con quitosano (Dosis 0-100).....	155
Tabla 8.14 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 50:50 (Dosis 0-100).....	156
Tabla 8.15 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 75:25 (Dosis 0-100).....	157

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.16 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 25:75 (Dosis 0-100).....	158
Tabla 8.17 Pruebas de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 100-200).	159
Tabla 8.18 Pruebas de jarras con moringa (Dosis 100-200).....	160
Tabla 8.19 Pruebas de jarras con quitosano (Dosis 100-200).	161
Tabla 8.20 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 50:50 (Dosis 100-200).....	162
Tabla 8.21 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 75:25 (Dosis 100-200).....	163
Tabla 8.22 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 75:25 (Dosis 100-200).....	164
Tabla 8.23 Prueba de jarras con sulfato de aluminio.	165
Tabla 8.24 Prueba de jarras con moringa.....	165
Tabla 8.25 Prueba de jarras con quitosano.	166
Tabla 8.26 Prueba de jarras con M:Q 50:50.....	166
Tabla 8.27 Prueba de jarras con M:Q 75:25.....	167
Tabla 8.28 Prueba de jarras con M:Q 25:75.....	167

Índice de Figuras

Figura 4.1 Carga eléctrica que rodea a una partícula.	30
Figura 4.2 a) Electroforesis, partículas que se mueven en un líquido sin movimiento. b) Electroósmosis, partículas sin movimiento en un líquido en movimiento. c) Potencial de corriente, líquido se mueve, diferencia de potencial en el pistón.	38
Figura 4.3 Capa Difusa.	39
Figura 4.4 Adsorción de contraiones en la partícula coloidal. a) Iones o productos de hidrólisis simples; b) Polímeros de Al(III) y Fe(III).	41
Figura 4.5 Adsorción de polímeros en una partícula de caolinita.	43
Figura 4.6 Zonas de coagulación de turbidez para distintas dosis de sulfato de aluminio a distinto pH.	46
Figura 4.7 <i>Moringa oleifera</i> : a) Árbol, b) Vainas que contienen las semillas, c) Semillas, d) Semillas peladas, y e) Polvo obtenido de la trituración de las semillas.	49
Figura 4.8 Estructura del quitosano.	50
Figura 4.9 Prueba de Jarras.	52
Figura 5.1 Analizador de carbono MultiNC 3000 AnalytikJena.	54
Figura 5.2 Espectrofotómetro de absorción atómica modelo SOLAAR M6 Thermo Elemental	54
Figura 5.3 Molino Micro-Mill.	57
Figura 5.4 Prueba de jarras JLT-6 Velp Scientifica.	59
Figura 5.5 Equipo de potencial Zeta, ZetaPlus, Brookhaven Instruments.	61
Figura 5.6 Equipo de espectrometría de infrarrojo Thermo Scientific Nicolet iS10.	61
Figura 5.7 Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca: JEOL, modelo: JSM-5900 LV.	62
Figura 5.8 Difractómetro de Rayos X, D5000 X- Ray Diffractometer, Siemens.	63
Figura 5.9 Diagrama de flujo de la metodología.	64
Figura 6.1 (a) Gráfica de la variación del pH respecto al volumen de KOH empleado para la obtención de la curva de titulación del sulfato de aluminio. (b) Curva de Gran de Sulfato de Aluminio y relación con el volumen de KOH.	67
Figura 6.2 (a) Gráfica de la variación del pH respecto al volumen de KOH empleado. (b) Curva de Gran de Sulfato de Aluminio con KNO_3 y relación con el volumen de KOH.	69
Figura 6.3(a). Gráfica de la variación del pH de la semilla de moringa respecto al volumen de KOH empleado. (b) Curva de Gran de la semilla de moringa y relación con el volumen de KOH.	71
Figura 6.4(a) Gráfica de la variación del pH de la semilla de moringa como coagulante respecto al volumen de KOH, con KNO_3 como electrolito soporte. (b) Curva de Gran de la semilla de moringa con KNO_3 y relación con el volumen de KOH.	73
Figura 6.5(a). Gráfica de la variación del pH del quitosano respecto al volumen de KOH. (b) Curva de Gran del quitosano y relación con el volumen de KOH.	75
Figura 6.6(a). Gráfica de la variación del pH del quitosano con electrolito soporte KNO_3 respecto al volumen de KOH. (b) Curva de Gran del quitosano con KNO_3 y relación con el volumen de KOH.	77

Figura 6.7 Espectros IR de Quitosano de viscosidad alta (QVA), viscosidad media (QVM) y viscosidad baja (QVB). Tomado de la tesis de Sergio Martínez González, (2008), tres quitosanos comerciales.....	80
Figura 6.8. (a) Comparación de los espectros de quitina blanqueada. (b) quitosano sintetizado y quitosano comercial de viscosidad media.....	81
Figura 6.9 MEB del quitosano de viscosidad alta.....	82
Figura 6.10 MEB del quitosano de viscosidad media.....	83
Figura 6.11 MEB del quitosano obtenido de la cáscara de camarón.....	84
Figura 6.12: Componentes menores del quitosano de viscosidad alta.....	85
Figura 6.13: Componentes menores del quitosano de viscosidad media.....	85
Figura 6.14: Espectro del quitosano de la cáscara de camarón.....	86
Figura 6.15 Prueba de jarras con coagulante.....	87
Figura 6.16 Turbidez residual vs dosis de sulfato de aluminio.....	88
Figura 6.17 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de sulfato de aluminio.....	88
Figura 6.18 Turbidez residual vs dosis de moringa/NaCl.....	89
Figura 6.19 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de moringa/NaCl.....	90
Figura 6.20 Turbidez residual vs dosis de moringa con extracción simple.....	91
Figura 6.21 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de moringa con extracción simple.....	91
Figura 6.22 Turbidez residual vs dosis de quitosano.....	92
Figura 6.23 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de quitosano.....	93
Figura 6.24 Turbidez residual vs dosis de coagulante.....	93
Figura 6.25 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.....	94
Figura 6.26 Turbidez residual vs dosis de coagulante.....	95
Figura 6.27 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.....	95
Figura 6.28 Turbidez residual vs dosis de moringa.....	96
Figura 6.29 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de moringa.....	97
Figura 6.30 Turbidez residual vs dosis de coagulante.....	98
Figura 6.31 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.....	98
Figura 6.32 Comparación de la turbidez residual obtenida con cada uno de los coagulantes.....	99
Figura 6.33 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes.....	99
Figura 6.34 Turbidez residual vs dosis de coagulante.....	100
Figura 6.35 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.....	101
Figura 6.36 Turbidez residual vs dosis de coagulante.....	102
Figura 6.37 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.....	102
Figura 6.38 Turbidez residual vs dosis de coagulante.....	103
Figura 6.39 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.....	104
Figura 6.40 Comparación de la turbidez residual obtenida con cada uno de los coagulantes.....	104
Figura 6.41 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes.....	105
Figura 6.42 Comparación de la turbidez residual vs dosis de coagulante, para los coagulantes y sus mezclas.....	105

Figura 6.43 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes y sus mezclas.	106
Figura 6.44 Turbidez residual vs dosis de coagulante.	107
Figura 6.45 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.	108
Figura 6.46 Turbidez residual vs dosis de coagulante.	109
Figura 6.47 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.	109
Figura 6.48 Turbidez residual vs dosis de coagulante.	110
Figura 6.49 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.	110
Figura 6.50 Comparación de la turbidez residual obtenida con cada uno de los coagulantes.	111
Figura 6.51 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes.	111
Figura 6.52 Turbidez residual vs dosis de coagulante.	113
Figura 6.53 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.	113
Figura 6.54 Turbidez residual vs dosis de coagulante.	114
Figura 6.55 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.	114
Figura 6.56 Turbidez residual vs dosis de coagulante.	115
Figura 6.57 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.	116
Figura 6.58 Comparación de Turbidez residual vs dosis de cada coagulante.	116
Figura 6.59 Comparación del porcentaje de remoción de vs dosis de coagulante.	117
Figura 6.60 Comparación de la turbidez residual vs dosis de coagulante, para los coagulantes y sus mezclas.	117
Figura 6.61 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes y sus mezclas.	118
Figura 6.62 Diferencia en el tamaño de los flocs que se forman después de la fase de mezcla rápida.	120
Figura 6.63 Flocs que se formaron al utilizar una velocidad baja de mezcla rápida.	120
Figura 6.64 Turbidez residual del sulfato de aluminio en función del pH del agua.	122
Figura 6.65 Eficiencia de remoción del sulfato de aluminio en función del pH del agua.	122
Figura 6.66 Turbidez residual de moringa en función del pH del agua.	123
Figura 6.67 Eficiencia de remoción de moringa en función del pH del agua.	123
Figura 6.68 Turbidez residual de quitosano en función del pH del agua.	124
Figura 6.69 Eficiencia de remoción de quitosano en función del pH del agua.	125
Figura 6.70 Turbidez residual de la mezcla M:Q 50:50 en función del pH del agua.	126
Figura 6.71 Eficiencia de remoción de la mezcla M:Q 50:50 en función del pH del agua.	126
Figura 6.72 Turbidez residual de la mezcla M:Q 75:25 en función del pH del agua.	127
Figura 6.73 Eficiencia de remoción de la mezcla M:Q 75:25 en función del pH del agua.	127
Figura 6.74 Turbidez residual de la mezcla M:Q 25:75 en función del pH del agua.	128
Figura 6.75 Eficiencia de remoción de la mezcla M:Q 25:75 en función del pH del agua.	129
Figura 6.76 Movilidad electroforética medida en el agua residual.	131
Figura 6.77 Potencial Z del agua residual.	131

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Figura 6.78 Movilidad electroforética medida con el sulfato de aluminio con dosis óptima.	132
Figura 6.79 Potencial Z con sulfato de aluminio con dosis óptima.	132
Figura 6.80 Movilidad electroforética medida con la moringa con dosis óptima.	133
Figura 6.81 Potencial Z con moringa con dosis óptima.	133
Figura 6.82 Movilidad electroforética medida con el quitosano con dosis óptima.	134
Figura 6.83 Potencial Z con quitosano con dosis óptima.	134
Figura 6.84 Movilidad electroforética medida con la combinación M:Q 50:50 con dosis óptima.	135
Figura 6.85 Potencial Z con la combinación M:Q 50:50 y dosis óptima.	135
Figura 6.86 Movilidad electroforética medida con la combinación M:Q 75:25 con dosis óptima.	136
Figura 6.87 Potencial Z con la combinación M:Q 75:25 y dosis óptima.	136
Figura 6.88 Movilidad electroforética medida con la combinación M:Q 75:25 con dosis óptima.	137
Figura 6.89 Potencial Z con la combinación M:Q 75:25 y dosis óptima.	137
Figura 8.1 Curva de calibración para el Calcio.	147
Figura 8.2 Curva de calibración para el Cobre.	147
Figura 8.3 Curva de calibración para el Hierro.	147
Figura 8.4 Curva de calibración para el Potasio.	148
Figura 8.5 Curva de calibración para el Manganeso.	148

RESUMEN

La problemática de la escasez mundial de agua ha generado que se realicen grandes esfuerzos en la búsqueda de soluciones que permitan el tratamiento y la disposición de aguas residuales de distintas procedencias. Entre las etapas del tratamiento de las diferentes aguas residuales, se encuentra la coagulación, proceso mediante el cual las partículas coloidales se desestabilizan para posteriormente aglutinarse, formando pequeñas masas cuyo peso específico superior al del agua les permite sedimentar y que puedan ser separadas mediante decantación, causando en el agua una remoción de la turbidez orgánica y/o inorgánica, color, en ciertos casos la eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos, y de sólidos suspendidos, entre otros. La mayoría de los procesos de tratamiento del agua emplean sulfato de aluminio como coagulante, cuya principal consecuencia es la generación de una importante cantidad de lodos ricos en aluminio. Durante mucho tiempo el aluminio fue considerado no tóxico y, en especial, inocuo para los seres humanos; sin embargo, se ha demostrado que puede producir efectos adversos en plantas, animales acuáticos y seres humanos, cuando se libera al ambiente. En México, la presencia del aluminio en el agua potable está regulada por la NOM-127-SSA1-1994, que establece un límite máximo de aluminio de 0.2 mg/L considerando que niveles más elevados pueden afectar la salud humana. En los últimos años se ha observado un creciente interés en el desarrollo de coagulantes naturales como la quitina y el quitosano, que provienen de crustáceos. En este trabajo se presenta el uso de dos coagulantes naturales: moringa y quitosano, y su comparación con el sulfato de aluminio; además del aprovechamiento de la cáscara de camarón, que es un desecho que puede ser utilizado para la obtención de quitina y quitosano. El uso de estos coagulantes naturales resulta ser muy atractivo debido a su menor costo en comparación con los agentes sintéticos, además de ser biodegradables y no afectan las cepas bacterianas cuando se requiere la estabilización de los lodos generados en los sistema aerobios de tratamiento y estos lodos pueden ser utilizados, por ejemplo, en la adecuación de suelos por su alto contenido de materia orgánica. Además con pruebas en el laboratorio se demostró que su uso mejora las propiedades de sedimentación de los lodos de origen municipal, sustituyendo a los coagulantes sintéticos.

The issue of global water scarcity has led to great efforts to finding solutions to the treatment and disposal of wastewater from different backgrounds and the ability to be reused in different applications. Among the processing steps in treatment of wastewater; the process of coagulation is very important, it is in this process whereby the colloidal particles collide with each other to form small masses, where their specific gravity being greater than the water's allows them to sediment. The colloidal particles can be separated by decantation causing turbidity removal of inorganic and organic substances, color, suspended solids, and in some cases the removal of bacteria, virus and pathogens, and the elimination of substances that produce bad taste and odors from waste waters. Most water treatment processes employ aluminum sulfate as coagulant. The main consequence of the application of this material is the generation of a significant amount of sludge rich in aluminum. For a long time aluminum was considered non-toxic and, especially, harmless to humans; however, it has been shown to produce adverse effects on plants, aquatic animals and humans, when it is released to the environment. In Mexico, the NOM-127-SSA1-1994 sets a maximum limit of aluminum in drinking water of 0.2 mg / L whereas higher levels can affect human health. In recent years there has been an increasing interest in the development of natural coagulants, such as chitosan, which comes from the synthesis of crustacean chitin. In this work it is presented the usage of two natural coagulants: moringa and chitosan and their comparison with aluminum sulfate. Besides it is used shrimp shell, which is a waste product that can be used for the synthesis of chitin and chitosan that can be used as a coagulant in municipal water treatment. The usage of these natural coagulants is very attractive due to its lower cost compared with the synthetic agents, they are biodegradable and do not affect the bacterial strains in the stabilization of sludge in aerobic treatment systems, and the sludge generated can be used in soil remediation for its high content of organic matter. In addition, laboratory tests demonstrated that the use of natural coagulants improved the settling properties of the sludge from municipal sources, replacing the synthetic coagulants.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Debido a la creciente problemática de la escasez mundial de agua, la comunidad científica internacional dedica grandes esfuerzos a la búsqueda de soluciones que permitan el tratamiento y la disposición de aguas residuales de distinta procedencia, así como la posibilidad de ser reutilizadas en diversas aplicaciones. Entre las etapas del proceso de tratamiento de las aguas residuales, se encuentra la coagulación – floculación, proceso mediante el cual las partículas se aglutinan formando pequeñas masas, cuyo peso específico superior al del agua les permite sedimentar y que puedan ser separadas mediante decantación, causando en el agua la remoción de la turbidez, eliminación de color, en algunos casos la eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos, destrucción de algas y eliminación de sustancias productoras de sabor, olor, y de precipitados químicos suspendidos, entre otros.

En la actualidad, la mayoría de los procesos de tratamiento del agua emplean sulfato de aluminio como coagulante, y las cantidades usadas de este material dependen del contenido de sólidos presentes en el agua. La principal consecuencia de su aplicación es la generación de una importante cantidad de lodos ricos en aluminio. Durante mucho tiempo este material fue considerado no tóxico y en especial, inocuo para los seres humanos; no obstante, estudios recientes han mostrado la toxicidad de los metales contenidos en los lodos que se producen en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Se ha demostrado que el aluminio de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas tiene un efecto de toxicidad para los organismos acuáticos como: crustáceos, mosquitos y peces (Sotero Santos et al., 2007); de igual forma, mostraron efecto de toxicidad crónica y aguda sobre: algas, protozoarios, bacterias marinas y peces (George et al., 1995); Los lodos generados en este proceso se caracterizan por presentar entre 0.1 a 27.0% de sólidos totales, de 4.0 a 40.0% de aluminio y valores de pH entre 5.5 y 8.0 (Panizza, 2006); estas condiciones pueden contribuir de manera importante a la contaminación de los suelos, por lo cual, es necesario tratarlos o buscar alternativas al uso del sulfato de aluminio. Las concentraciones a las cuales el aluminio genera efectos adversos en los seres vivos dependen del tipo de ser vivo, de la biodisponibilidad del

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

metal y del tiempo de exposición al mismo (Panizza *et al*, 2008). En México, la NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo de aluminio en el agua potable de 0.2 mg/L considerando que niveles más elevados pueden afectar la salud humana (DOF, 1996).

Históricamente, los primeros coagulantes fueron de origen mineral o vegetal, pero la falta de conocimiento científico de sus mecanismos de acción llevó a su reemplazo por sustancias químicas, y su consecuente problemática (Poumaye, *et al*, 2012). Es por lo anterior que en los últimos años se ha observado un creciente interés en el desarrollo de coagulantes naturales, tales como la *Moringa oleífera*, y el Quitosano. Mediante el uso de coagulantes naturales se pueden alcanzar considerables ahorros en sustancias químicas y en el tratamiento de lodos (Bina *et al*, 2010). La moringa es una planta con diversas aplicaciones, entre las que destacan sus propiedades como coagulante desde 1979 (Yin, 2011). La ventaja del uso de las semillas de Moringa, es permitir la sustitución de floculantes importados por productos locales de fácil acceso. A diferencia del sulfato de aluminio, este floculante es completamente biodegradable (Poumaye *et al*, 2012). Por otro lado, el quitosano se obtiene típicamente de los artrópodos, caparazones de crustáceos y de algunas levaduras (Fabris, 2010). Los grupos funcionales NH₂ presentes en la estructura del quitosano hacen que su molécula esté cargada positivamente, lo cual facilita la interacción con materiales coloidales y con materiales aniónicos suspendidos. El quitosano, como agente coagulante, es eficiente a concentraciones mucho menores en comparación con las sales metálicas convencionales, y no deja metales residuales después de la coagulación (Zonoozi, 2011).

Es por lo anteriormente expuesto que en este proyecto se busca el uso de coagulantes naturales para el proceso de coagulación-floculación; ya que el uso de éstos representa varias ventajas respecto a los coagulantes actualmente utilizados, que son sintéticos. Entre estas ventajas destaca el hecho de que los coagulantes de origen natural no aportan metales a los lodos producidos por el proceso de coagulación-floculación, facilitando así el posterior tratamiento y la aplicación de los biosólidos.

1.2 Antecedentes

El uso de los coagulantes químicos presenta algunos inconvenientes, tales como sus costos, la falta de disponibilidad en el área, y principalmente la presencia de metales en los residuos de las aguas tratadas, y el gran volumen de lodos generados en el proceso.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Estos lodos son a menudo de baja calidad ya que contienen residuo de metales que afectan la biodegradabilidad y resultan en características pobres después de su deshidratación (Ghebremichael et al, 2009).

Es por lo tanto necesario evaluar el rendimiento de otros coagulantes en la clarificación de las aguas residuales. Estos coagulantes alternativos son obtenidos a menudo de desechos de alimentos y por lo tanto no son tóxicos y son de bajo costo. Entre ellos se encuentran taninos, semillas de Moringa Oleifera, granos de mezquite y cactus latifaria (Ozacar y Sengil, 2003), y muchas otras variedades de extractos de plantas. Muchos de estos son específicos de cada región de origen. La moringa es conocida como una planta medicinal, y una fuente de aceite vegetal, debido a esto y al hecho de que la mayoría de sus partes es útil para una gran variedad de aplicaciones, es considerada de gran valor (Rodríguez et al, 2007). Entre estas aplicaciones, las semillas de moringa son utilizadas como un método alternativo de tratamiento de aguas en países en desarrollo. Se ha reportado el uso efectivo de este material en el tratamiento de aguas residuales, observándose una mayor eficiencia en aguas con mayor turbidez. Una suspensión de semillas trituradas reduce la turbidez y mejora la calidad del agua (Ghebremichael et al, 2009).

Una proteína extraída de las semillas de moringa puede eliminar ácidos húmicos del agua, reducir la materia orgánica, eliminar los olores y la coloración del agua. Ha sido sugerido que su mecanismo involucra adsorción y la neutralización de cargas (Santos et al, 2011). Diversos estudios realizados mostraron que el uso del coagulante proveniente de la semilla moringa es comparable al sulfato de aluminio, siendo recomendada su utilización como un coagulante eficaz para el tratamiento de agua (Lédo et al, 2009).

Otro coagulante disponible de manera natural es la quitina o su derivado quitosano, el cual típicamente se deriva de artrópodos, del caparazón de crustáceos así como también de algunas hongos y levaduras (Fabris, 2010). La quitina es un biopolímero que se encuentra presente en el exoesqueleto de artrópodos como: langostas, cangrejos y camarón; insectos y también se encuentra en la pared celular de las diatomeas, y otras algas, y hongos; este material por sí mismo no es tóxico y es relativamente fácil de degradar, por lo que su aplicación es ambientalmente aceptable (Crini, 2005). Como base del quitosano, la quitina es el segundo biopolímero de mayor importancia en nuestro planeta (sólo después de la celulosa).

Es importante considerar algunos aspectos básicos sobre el camarón: Tipos de camarón, debido a la calidad de quitina y por lo tanto de quitosano. Aun cuando en el ámbito mundial existen 342 especies de camarón con valor comercial, son unas cuantas las especies que son importantes en el mercado. Esas especies se pueden clasificar en tres grupos básicos: a) El Camarón Tropical, b) El Camarón de Río o de Aguadulce, y c) El Camarón de Agua Fría.

1) El Camarón Tropical: Constituye el tipo de camarón más popular y abundante en el mercado de los Estados Unidos. La mayoría se caracteriza por el color de su cáscara cuando están crudos: blanco, café, rosa y tigre negro. Otro tipo de camarón de aguas tropicales es el camarón de roca, y se le conoce así debido a su cáscara dura. El camarón blanco tiene la cáscara de color blanco-grisáceo, la cual se torna rosada al cocinarse. La cáscara del camarón blanco de cultivo es de un tono blanco-grisáceo más claro y son más delgadas que las silvestres) La cáscara más delgada de éstos últimos es consecuencia tanto de la composición del alimento, como del crecimiento en cautiverio. El camarón cultivado tiene un sabor más delicado y una textura más suave, esto se debe a que el camarón silvestre se alimenta de crustáceos y algas marinas, lo que enriquece su sabor y fortalece su cáscara, (Hernández *et al*, 2008). El camarón rosa es capturado en el Golfo de México, el Caribe y Centroamérica. Su cáscara de color rosa claro, muestra una textura nacarada y algunos presentan una mancha distintiva rosada en la cabeza. y consistente. El camarón "tigre negro", crece con rapidez y se ha convertido en una especie muy popular en la acuicultura. El "tigre negro" o "black tiger" fue introducido en el mercado de los Estados Unidos alrededor de 1980 y ha crecido enormemente en popularidad debido principalmente a que tiene un precio más bajo. Se cultiva principalmente en los países asiáticos, su nombre se origina de la característica cáscara que presenta cuando está crudo vetas negras y grises. Después de su cocción, la cáscara se vuelve roja brillante.

2. HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

2.1 Hipótesis

El uso de los coagulantes y floculantes naturales biodegradables mejorará las propiedades de sedimentación de los lodos de origen municipal y agrícola, sustituyendo a los coagulantes sintéticos.

2.2 Objetivo General

Determinar la capacidad de coagulación–floculación de materiales de origen natural para mejorar las propiedades de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas.

2.2.1 Objetivos Específicos

- Obtener coagulantes naturales a partir de goma de moringa, y quitina y quitosano de la cáscara de camarón.
- Caracterizar químicamente *los metales traza* de las semillas de moringa, que se utilizará para la extracción de las gomas que se emplearán como coagulantes.
- Determinar las propiedades eléctricas superficiales (movilidad electroforética y potencial Zeta), y tamaño de partícula de los materiales que se emplearán como coagulantes para la obtención del mejor rendimiento de sedimentación de los lodos provenientes del agua residual del municipio de Tlachaloya.
- Determinar las condiciones óptimas de pH, tiempo de contacto y agitación del proceso, parámetros importantes para la mezcla rápida, floculación y velocidad de sedimentación, así como los mecanismos a través de los cuales la coagulación se efectúa de forma eficiente.
- Determinar las dosis óptimas de cada coagulante.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

- Construir las curvas de coagulación (dosis de coagulante vs turbidez residual; dosis de coagulante vs eficiencia de remoción; turbidez residual vs pH; eficiencia de remoción vs pH) de los coagulantes naturales para obtener la eficiencia de cada uno, así como de sus mezclas y seleccionar la opción que presente la mejor eficiencia en el proceso coagulación-floculación para el caso específico del tratamiento del agua residual de Tlachaloya, Edo. de México.

2.3 Justificación

La descarga de aguas residuales a los sistemas acuáticos, sin previo tratamiento, es un problema generalizado en México; tal es el caso del río Lerma en donde ha sustituido el aporte de agua limpia, por el agua residual del valle de Toluca. Los intentos por tratar el agua antes de su descarga han resultado infructuosos y esto ha causado que el río presente condiciones sépticas en todo su recorrido, incluyendo el primer cuerpo receptor que es la presa José Antonio Alzate, creando condiciones peligrosas para la salud y limitando el uso de esta agua (Rosas de Alva et al, 2010). En el presente trabajo se plantea que el uso de los coagulantes naturales mejorará las propiedades de sedimentación de los lodos de origen municipal y agrícola. El uso de coagulantes naturales resulta ser muy atractivo debido a su menor costo en comparación con los agentes sintéticos y, por otro lado, son biodegradables y no afectan las cepas bacterianas cuando se requiere la estabilización de los lodos generados en el proceso, permitiendo que éstos puedan ser utilizados en la adecuación de suelos por su alto contenido de materia orgánica (Quecholac, 2010). Partiendo de lo planteado anteriormente, se ha propuesto el uso de coagulantes derivados de materiales naturales, particularmente a partir de semillas de *Moringa oleífera* y cáscara de camarón, que no aporten al agua y a los lodos generados en el proceso sustancias que afecten su uso posterior.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 Coagulantes

Como menciona **Hernández (1990)**, los agentes químicos encargados de romper la estabilidad de los contaminantes en el agua se denominan coagulantes. Generalmente se utilizan coagulantes inorgánicos y/o polímeros durante el proceso de tratamiento de aguas para eliminar sólidos suspendidos, bacterias y virus.

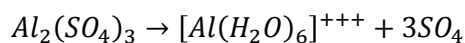
Sarkar et al (2006) mencionan que los procesos de coagulación-floculación son algunas de las operaciones más comunes en los trenes de tratamiento de aguas residuales debido a su facilidad, su efectividad, bajos costos de energía y disponibilidad de agentes coagulantes tales como el sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, sulfato ferroso, etc. Este proceso es principalmente usado para reducir los sólidos suspendidos y al material coloidal responsable por la turbidez, así como también para la reducción de materia orgánica, la cual contribuye a la demanda biológica de oxígeno (DBO) y a la demanda química de oxígeno (DQO) del agua residual.

3.1.1 Coagulantes sintéticos

Pritchard et al (2010) dicen que en la actualidad se utilizan principalmente dos sustancias químicas como coagulantes en países desarrollados: sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), y sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), conocidos como alumbre y férrico, respectivamente. Las sales de aluminio forman un floc ligeramente pesado; las más conocidas de éstas son el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de polialuminio. Entre las anteriores, el sulfato de aluminio es el coagulante más utilizado para el proceso de coagulación/floculación en el tratamiento primario de aguas residuales, debido a su bajo costo y su manejo relativamente sencillo. Debido a la disponibilidad limitada y al gasto relativo de estos químicos para los países en desarrollo, existe la necesidad de encontrar alternativas para la purificación del agua, sobre todo para localidades rurales.

3.1.1.1 Sulfato de Aluminio

Arboleda (2000) proporciona las características del sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, el cual es un polvo de color marfil, ordinariamente hidratado, que con el almacenaje suele convertirse en terrones relativamente duros. Cuando está en solución se encuentra hidrolizado, es decir, asociado con el agua:



Esta es una propiedad común con todos los cationes metálicos, que no pueden permanecer aislados cuando están rodeados de moléculas de agua. Debido a que las bases que constituyen la alcalinidad son más frecuentes que el agua, el $[Al(H_2O)_6]^{+++}$ reaccionará siempre con ellas, produciendo un consumo y descenso del pH. El producto final es un hidróxido de aluminio insoluble que precipita a ciertos pH y que puede no tener carga, o carga negativa. Las especies que contienen un sólo ion de aluminio se polimerizan y reaccionan entre sí. Tanto los iones de aluminio hidratados como los compuestos poliméricos pueden ser adsorbidos rápidamente por las partículas del agua, produciendo su desestabilización. Los hidróxidos de aluminio son, en cambio, menos efectivos como coagulantes.

3.1.1.2 Cloruro de Polialuminio

Rap y Bishop (2009) indican que el cloruro de polialuminio, es un derivado polimérico del aluminio que existe desde hace bastantes años en Europa y Japón, y que ahora se ha introducido también en el mercado norteamericano; los beneficios de este nuevo coagulante son:

- Una mejor formación del floc.
- Más amplio rango del pH.
- Menor generación de lodos.
- Poca o ninguna necesidad de usar conjuntamente polielectrolitos.

Su mayor desventaja es que es más costoso que el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, pero podría equilibrarse este costo si conjuntamente con los coagulantes metálicos hay necesidad de usar polielectrolitos.

3.1.1.3 Cloruro Férrico

Arboleda (2000) indica que el cloruro férrico puede ser conseguido de tres formas: como cristales hidratados ($\text{FeCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) amarillos o cafés, como cristales anhidros (FeCl_3) de color verde oscuro, o como solución del 35 al 45%. Sin importar su presentación, se aplica en solución del 2 al 20%, según el tamaño de la planta y la capacidad del aparato dosificador.

Este coagulante puede trabajar con rangos de pH que varían de 4-11; sin embargo, se suele utilizar a pH ácido y con aguas blandas, fuertemente coloreadas y que contienen ácido sulfhídrico.

3.1.1.4 Sulfatos Férrico y Ferroso

Arboleda (2000) también estudió al sulfato férrico, mencionando que se encuentra en su forma anhidra como $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, pero más comúnmente en su forma hidratado como $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. La adición de un álcali (cal, por ejemplo) en combinación con el coagulante resulta en un rango más amplio de pH en el cual se puede trabajar, el cual puede ir desde 3.5 hasta 11. Sin embargo, suele utilizarse con aguas muy ácidas.

El sulfato ferroso, por su parte, es la fuente más barata de hierro como coagulante. Generalmente se usa hidratado como $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; una de sus desventajas es que debe usarse en combinación con cal. En la práctica es conveniente agregar un pequeño exceso de cal, sin sobrepasar cierto límite para evitar la precipitación posterior del hidróxido férrico en las tuberías.

Este último se usa para aguas turbias, fuertemente alcalinas, con un pH superior a 8, y es, por lo tanto, inadecuado para tratar aguas blandas, especialmente si su contenido de color es alto ya que la alcalinidad interfiere con la remoción de color.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

3.2 Problemática del uso de coagulantes con contenido de Aluminio y Hierro

Crapper et al (1973) declararon que existen ciertas restricciones al uso de coagulantes de origen sintético, entre ellos el costo, la falta de disponibilidad en el área – especialmente en países en vías de desarrollo-, la presencia de metales residuales en el agua tratada, y el gran volumen de lodos producido. Estos lodos a menudo son de baja calidad y contienen metales, los cuales afectan su biodegradabilidad; igualmente hacen mención del hecho de que la presencia de metales residuales (como el aluminio) en el agua potable, ha sido relacionada con el desarrollo de Alzheimer.

Por su parte, **Pillai y Divakaran (2002)** reportaron que el uso de coagulantes inorgánicos tales como el sulfato de aluminio, cloruro férrico y algunos polímeros orgánicos sintéticos como el cloruro de polialuminio genera gran cantidad de los lodos de difícil disposición, con la subsecuente acumulación de metales en el ambiente.

De acuerdo a **Pacala et al (2009)**, el aluminio es considerado un elemento tóxico para las plantas y animales, por lo tanto, su presencia en suelos y sistemas acuáticos puede causar efectos negativos. El incremento de la acidez en suelos está asociado con niveles tóxicos de aluminio en las plantas.

Por otra parte, **Panizza (2006)** menciona el hecho de que el proceso de potabilización del agua emplea diferentes dosis de sulfato de aluminio como coagulante, esto depende principalmente del contenido de sólidos presentes en el agua residual. La consecuencia de la aplicación de sales de aluminio en el proceso, produce como residuo lodos ricos en este metal. De acuerdo con este mismo autor, en México se estimó una producción de lodos del orden de 338.6 L/s para el año 2003. Los lodos con sulfato de aluminio se caracterizan por presentar entre 0.1 a 27.0% de sólidos totales, de 4.0 a 40.0% de aluminio y valores de pH entre 5.5 y 8.0.

Arboleda (2000) señala que los lodos provenientes de la coagulación con hierro son altamente corrosivos, tienen un color café oscuro y suelen manchar o teñir los objetos y las corrientes de agua, haciéndolos difícil de manejar.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Ghebremichael et al (2009) indican algunas restricciones para el uso de los coagulantes químicos, tales como sus costos y la falta de disponibilidad en el área, especialmente en países en desarrollo; la presencia de metales en los residuos de las aguas tratadas, y el gran volumen de lodos que pueden producir. Estos lodos son a menudo de baja calidad ya que contienen metales que afectan la biodegradabilidad y resultan en características pobres después de su deshidratación.

3.3 Coagulantes naturales

Murillo (2009) destaca que es necesario evaluar el rendimiento de otros coagulantes en la clarificación de las aguas residuales debido a las desventajas ya mencionadas con el uso de coagulantes sintéticos. Los coagulantes alternativos son obtenidos a menudo de desechos de alimentos, por lo tanto, no son tóxicos y son de bajo costo. De acuerdo a Ozacar y Sengil (2003), entre estas alternativas se encuentran los taninos, semillas de *Moringa oleifera*, granos de mezquite y *Cactus latifaria*, y muchas otras variedades de extractos de plantas; siendo muchos de estos específicos de cada región de origen. Por otro lado, Fabris (2010) menciona que otro coagulante disponible de manera natural es la quitina o su derivado quitosano, el cual típicamente se deriva de artrópodos, del caparazón de crustáceos, así como también de algunos hongos y levaduras.

Habibian y O'Melia (1976) reportan que el uso de polímeros como ayudantes en la coagulación es uno de los métodos más efectivos para alcanzar las características deseadas en el influente de partículas que serán filtradas. Cuando un polímero es usado como coadyuvante en la coagulación, los puentes entre las partículas pueden incrementar el tamaño de las mismas. Si el polímero actúa para neutralizar la carga superficial de las partículas en la coagulación, la aglutinación puede ser mejorada mediante la reducción de las fuerzas eléctricas repulsivas, y la facilitación de una adsorción mutua de una molécula o de un grupo de moléculas.

Bolto y Gregory (2006) hacen alusión al hecho de que los polímeros han sido utilizados en el proceso de coagulación/floculación para la purificación del agua por las últimas cuatro décadas. En comparación con el alumbre, algunas de las ventajas del uso de polímeros en el tratamiento de aguas son: las bajas dosis requeridas, el menor volumen de lodos producidos, un incremento más pequeño en la carga iónica del agua tratada, el nivel reducido de aluminio en el agua, los ahorros en costos de 25-30%. El uso de

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

polímeros es especialmente benéfico cuando se presentan problemas de sedimentación lenta de los flocs a temperaturas bajas, o en el tratamiento de aguas suaves con color, en donde mejoran la sedimentación e incrementan la dureza de los flocs.

3.3.1 *Moringa oleifera*

Jahn (1989) menciona que el árbol de *Moringa* generalmente alcanza los 10 m de alto, éste puede ser cultivado fácilmente y está distribuido muy ampliamente en partes de África e India, con especies naturalizadas que pueden ser encontradas América tropical, Sri Lanka, México, Malasia y las Islas Filipinas. A nivel mundial han sido identificadas 14 especies diferentes, y todas producen sus semillas en vainas, que varían en longitud de 150 a 1200 mm, dependiendo de la especie; el peso de las semillas varía de la misma manera de 150 a 300 mg.

Okuda et al (1999) mencionan que los coagulantes naturales son biodegradables y seguros para la salud de las personas. Algunos estudios en coagulantes naturales han sido desarrollados y varios coagulantes naturales han sido producidos o extraídos de microorganismos, animales o plantas. La *Moringa oleifera* es conocida por contener un compuesto coagulante activo. Muchos han sido realizados para evaluar la eficiencia de la *Moringa oleifera* como un coagulante alternativo, o como coadyuvante en la coagulación. La remoción de turbidez del coagulante obtenido de la *Moringa oleifera* fue de hasta 80-99%, para aguas crudas y para aguas preparadas sintéticamente dentro del laboratorio.

Yin (2010) indica que la *Moringa* es una planta tropical no tóxica que puede encontrarse en la India, Asia, África y Latinoamérica, cuyas semillas contienen un aceite comestible y sustancias solubles en agua. Indiscutidamente es el coagulante natural más estudiado en la comunidad científica. La *Moringa* al ser un polielectrolito catiónico, actúa sobre las partículas que causan la turbidez en el agua, que generalmente poseen cargas superficiales negativas. Ya ha sido establecido que la interacción electrostática provee una fuerte adsorción en estos sistemas y que la neutralización de la carga superficial de las partículas, e incluso una inversión de la carga puede ocurrir.

Muthuraman y Sasikala (2013) realizaron un estudio sobre el uso de tres plantas como coagulantes naturales, entre ellas la *Moringa oleifera*. Se preparó agua sintética para las pruebas de turbidez. De entre las tres plantas utilizadas para el estudio (*Moringa oleifera*,

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

strychnos potatorum y phaseolus vulgaris), se encontró que la materia prima que demostró la mayor eficiencia en la eliminación de la turbidez fue la *Moringa oleifera*.

Muyibi et al (2013) presentaron un estudio de coagulación donde el coagulante natural obtenido de la *Moringa oleifera* se extrajo con una técnica simple (extracción con aceite, extracción con sal, y microfiltración con 0.2 µm). La turbidez residual obtenida fue de 4.514 NTU para agua preparada sintéticamente y de 1.598 NTU para agua de río, aplicando las condiciones óptimas de 40 rpm para el mezclado lento, un tiempo de agitación de 41 minutos, y una dosis de *Moringa oleifera* de 0.75 mg/L.

Sutherland et al (1990) compararon el potencial de la *Moringa oleifera* como coagulante con el del alumbre en el agua de un río. Sus resultados reportaron que el uso de una dosis de 40 mg/L de *Moringa* redujo la turbidez del agua del río de 150 a 10 NTU.

Muyibi y Evison (1996) realizaron un estudio de 3 meses en Kano, Nigeria; usando a la *Moringa oleifera* como coagulante primario, y también como un ayudante en la coagulación con alumbre para tratar agua de río con rangos de turbidez de 105 a 350 NTU. Una reducción de la turbidez de 99% fue alcanzada con *M. oleifera* con dosis óptimas de 250 y 450 mg/L; se encontró que cuando se utilizó a la *Moringa* como ayudante de coagulación, ésta podía reducir el volumen necesario de alumbre hasta en un 40%.

Rodríguez et al (2005) realizaron un estudio usando el extracto de *Moringa oleifera* para clarificar el agua de un río en Cuba. Encontraron que la dosis óptima a aplicar de la suspensión de *Moringa* para la naturaleza del agua utilizada, es de 89,5 mg/L mientras que el tiempo óptimo de agitación rápida es 2 min. De igual forma, mencionan que la Dureza total, la Alcalinidad total y el pH no varían significativamente en el intervalo estudiado para los factores: dosis, velocidades de agitación y tiempo de duración de las mismas. Reportaron que las proteínas totales constituyen el 10 % de los cotiledones de las semillas de *Moringa*. Las proteínas catiónicas presentes en los cotiledones de las semillas de las plantas de *Moringa* tropicalizada en Cuba constituyen el principio activo responsable de la coagulación del agua, las que se descomponen a temperatura ambiente en un período de 48 horas, mientras que son estables a la temperatura de 4 °C durante 3 meses, manteniendo su actividad coagulante.

Ledo et al (2009) compararon la eficiencia de los coagulantes sulfato de aluminio y semillas de *Moringa oleifera*, para la remoción de turbidez en muestras de agua de una laguna en Brasil. Determinaron que el mecanismo de coagulación de las semillas de *Moringa* es la adsorción y neutralización de cargas, y de adsorción y formación de puentes. De acuerdo a sus resultados, sugieren que las semillas de *Moringa oleifera* son un coagulante eficiente en aguas de baja turbidez, y pueden ser utilizadas como un sustituto viable del sulfato de aluminio.

Ferreira et al (2011) analizaron las propiedades de coagulación y antibacteriales de la lectina obtenida de semillas de *Moringa oleifera*, la cual es usada para el tratamiento de aguas. De acuerdo a los resultados obtenidos en su estudio, la lectina obtenida de las semillas de *Moringa oleifera* mostró actividad coagulante en aguas turbias, redujo el crecimiento de *Stafilococos aureus*, así como la reducción de *Escherichia coli*. De igual forma, fue efectiva en la reducción del crecimiento de las bacterias de agua de lago. Por sus resultados, se concluyó que la lectina de la *Moringa oleifera* es un biocoagulante natural con mucho potencial, además de reducir la turbidez, también ayuda con la reducción de sólidos suspendidos y con el crecimiento bacteriano.

Ghebremichael et al (2009) usaron el coagulante extraído de la *Moringa oleifera* para la remoción de turbidez, de carbón orgánico disuelto y de bacterias en aguas superficiales. El coagulante natural fue usado como coagulante primario y también como coadyuvante con sales metálicas. Mientras que para las sales metálicas la eliminación de bacterias fue principalmente por el proceso de coagulación-floculación, para la *Moringa oleifera* fue el resultado de coagulación y de la inhibición del crecimiento bacteriano; es por esta razón que se espera que el uso de la m. oleifera mejore la calidad de los lodos biológicos. De acuerdo a su estudio, de entre todos los parámetros del proceso de coagulación, el tiempo de mezcla lenta influyó considerablemente en la eficiencia del coagulante natural.

Bina et al (2010) examinaron los efectos coagulantes del sulfato de aluminio en conjunto con la proteína obtenida de la *Moringa oleifera*, como coadyuvante, en la remoción de turbidez, dureza y de bacterias en el agua. Observaron que la mejor remoción ocurrió con un pH de 7 a 7.5. La eficiencia obtenida usando a la *Moringa* como coadyuvante fue del 80-99%. Adicionalmente, reportan que el uso de la *Moringa* como coadyuvante redujo

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

significativamente la dosis del coagulante primario; el aluminio residual en las aguas tratadas fue menor a 0.2 mg/L. En cuanto a la remoción de bacterias, se obtuvo una reducción del 99.2-99.97% en las primeras dos horas de tratamiento. De acuerdo a estos resultados, concluyen que el uso de la *Moringa oleifera* como coadyuvante en el proceso de coagulación puede ser empleado en el tratamiento del agua potable, sin que haya riesgo de liberación de nutrientes orgánicos.

Pritchard et al (2010) desarrollaron una investigación comparativa entre la eficiencia de la *Moringa oleifera*, el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y el sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). El agua utilizada consistió en agua desionizada con *Escherichia coli* (E. coli) en 10^4 por 100 ml y turbidez de 146 NTU, creada artificialmente con caolinita. Los resultados mostraron que la *M. oleifera* removió el 84% de la turbidez y el 88% de E. coli, mientras que el alumbre eliminó más del 99% de turbidez y E. coli. Por otro lado, agua de un río con baja turbidez (<5 NTU), con E. coli de 705 ufc (unidades formadoras de colonias) en 100 ml, fue tratada con *M. oleifera* y férrico. Los resultados mostraron una reducción de 82 y 94% de E. coli para *Moringa* y férrico, respectivamente. Las pruebas en agua modelo, usando una segunda etapa de tratamiento con filtros de arena mostró una remoción máxima de turbidez de 97% y una reducción máxima del 98% usando *M. oleifera*, comparada con 100% de turbidez y 97% de E. coli para el alumbre. Pese a que la *M. oleifera* no es tan efectiva como el alumbre o el férrico, mostró suficiente capacidad de remoción para incentivar su uso en el tratamiento de aguas turbias en países en vías de desarrollo.

Sutherland (1994) realizó pruebas de campo en la planta de tratamiento de aguas residuales de Thyolo, Malawi en 1992. Se encontró que con una dosis de 75 a 250 mg/L de moringa, una etapa de floculación en lecho de grava y un tanque de sedimentación de flujo horizontal, se podía reducir la turbidez de alrededor de 400 a menos de 5 NTU.

Ndabigengesere et al (1994) mencionan en su trabajo que los agentes activos de las semillas de *Moringa oleifera* son proteínas catiónicas diméricas con un peso molecular de 13 KDa, y puntos isoeléctricos entre 10 y 11. De igual forman, reportan que el mecanismo de coagulación de la *Moringa oleifera* parece consistir en la adsorción y neutralización de las cargas del coloide. En comparación con el alumbre, la dosis óptima de las semillas peladas fue casi la misma (50 mg/L). En el caso de las semillas sin pelar, la dosis es mayor (500 mg/L) para aguas con baja turbidez inicial. Las proteínas purificadas son un

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

coagulante más efectivo que el alumbre. Como coagulante, la *Moringa* no es tóxica y es biodegradable, a diferencia del aluminio, no afecta significativamente el pH y la conductividad del agua después del tratamiento. Los lodos producidos por la coagulación con *Moringa* no sólo son inocuos, sino también de 4 a 5 veces menores en volumen que los lodos producidos por la coagulación con alumbre. Dado lo anterior, la *Moringa oleifera* puede ser una sustitución viable del alumbre.

Muyibi y Evison (1995) reportan que la *Moringa oleifera* es un coagulante natural con un gran potencial para ser usado a gran escala en el tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo. Derivado de los resultados obtenidos, se encontró que las dosis grandes del coagulante eventualmente generan la saturación de los puentes de los polímeros. Esto resulta en una reestabilización de las partículas que inicialmente fueron desestabilizadas, debido al número insuficiente de partículas para formar más puentes. Por otro lado, la *Moringa oleifera* es un polielectrolito catiónico, y el incremento en su dosis genera, en última instancia, una inversión de la carga de las partículas y la subsecuente reestabilización de las partículas desestabilizadas. Lo anterior resulta en la en el incremento de la turbidez residual. En los experimentos realizados se logró una remoción de turbidez de hasta 98.5% para muestras de agua con valores iniciales elevados de turbidez (600 NTU). Esta observación puede ser explicada en términos del incremento de las partículas suspendidas disponibles para la adsorción y la formación de puentes entre ellas. El efecto neto es el aumento en la frecuencia de colisión de las partículas y la tasa de aglomeración.

Ndabigengesere y Narasiah (1997) realizaron un estudio comparativo de coagulación-floculación-sedimentación entre el extracto de semillas de *Moringa oleifera* y alumbre, usando pruebas de jarras. Las mediciones de pH, conductividad, alcalinidad, concentración de cationes y aniones, mostraron que la coagulación con semillas de *Moringa* no afecta significativamente la calidad del agua tratada. Sin embargo, la concentración de materia orgánica en el agua se incrementó considerablemente con las dosis de *Moringa*. Debido a que esta materia orgánica puede ejercer una demanda de cloro y también actuar como un precursor de trihalometanos durante la desinfección con cloro, se sugiere que las semillas de *Moringa* sean usadas como coagulante en el tratamiento únicamente después de haber purificado sus proteínas activas.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Bhuptawat et al (2007) destacan que el uso de la *Moringa oleifera* como coagulante no ha alcanzado todo su potencial. En términos de aplicación al tratamiento de aguas, las semillas de *Moringa oleifera* en diversas formas purificadas ha probado ser efectiva en la remoción de material suspendido, generar volúmenes reducidos de lodos en comparación con el aluminio, para suavizar aguas duras, y como un adsorbente efectivo de cadmio. Sin embargo, esta tecnología no ha sido aún adaptada a alguna planta de tratamiento en ninguna escala. La mayor preocupación en el uso del extracto de estas semillas es la carga orgánica residual y el material que estará presente en las aguas tratadas. En su estudio se incorporó el uso del coagulante obtenido de la *Moringa oleifera* a un sistema de tratamiento de aguas que incluyó coagulación, floculación, sedimentación y filtración; la remoción global de DQO fue del 64%, y se obtuvo con la combinación de 100 mg/L de *M. oleifera* y 10 mg/L de alumbre.

Prasad (2009) realizó un estudio para eliminar el color de un efluente de una destilería mediante el proceso de coagulación/floculación usando *Moringa oleifera* como coagulante. Las destilerías se encuentran entre las industrias que generan más contaminación del agua, entre sus principales residuos se sitúa el agua de lavado, el cual contiene cerca del 2% de un pigmento recalcitrante color café oscuro, conocido como melanoidina. Se usaron dosis de 20 y 60 ml, el pH de trabajo fue de 7 y 8.5, respectivamente; para obtener una remoción de olor del 56 y 67%.

Por otra parte, **Sengupta et al (2012)** realizaron un estudio en Ghana con *Moringa oleifera* para reducir la turbidez y el número de huevos de helminto. El agua de corrientes contaminadas y extraída de pozos es comúnmente utilizada para el riego en los cultivos urbanos en Ghana, pero la presencia de huevos de helminto en el agua representa un grave riesgo a la salud. Debido a que el tratamiento del agua es caro, requiere avances tecnológicos y que a menudo requiere mantenimiento y reparación es necesario la aplicación de procesos de menor costo. En este estudio se desarrollaron pruebas de campo y de laboratorio para conocer el efecto de la *Moringa oleifera* como coagulante natural en la reducción de huevos de helminto y de turbidez en el agua para riego. En aguas con turbidez media-alta, el extracto de *Moringa oleifera* redujo el número de huevos de helminto de un 94 a un 99.5% (1 a 2 huevos en un litro) y la turbidez a un nivel de 7-11 NTU, lo cual fue una reducción del 85-96%.

3.3.2 Quitosano

Lalov et al (2000) presentan al quitosano como un polímero natural modificado, obtenido a partir de la quitina presente en el exoesqueleto de algunos crustáceos como el camarón, cangrejo y el cangrejo de río, entre otros. Sus propiedades como el ser un material no tóxico, biodegradable, con capacidad de floculante, y su capacidad para regenerarse tienen muchas aplicaciones. Entre estas últimas, su uso más amplio es como floculante catiónico en el tratamiento de aguas residuales con carga orgánica, y como agente quelante de metales tóxicos. En su estudio aplicaron un proceso de intercambio iónico usando al quitosano como intercambiador de iones, para lograr una purificación simultánea del agua residual y metanización del contenido orgánico de una corriente de desecho de una destilería, sin una separación preliminar de las sustancias orgánicas. De acuerdo a sus ventajas reportadas, entre las más importantes destaca el hecho de que el quitosano es muy accesible y barato; su carga positiva permite una adsorción efectiva de los principales componentes ácidos de la vinaza; y el método desarrollado permite una metanización directa con o sin una hidrólisis preliminar.

Sahidi y Abuzaytoun (2005) reportan que desde 1986 ya se conocía de la posibilidad del uso del quitosano en el tratamiento de aguas residuales, sobre todo por su gran capacidad de adsorción. Es de especial atención su uso en la recuperación de iones metálicos, la cual puede lograrse mediante la formación de quelatos por procesos de intercambio iónico; la quitina y el quitosano tienen la capacidad de disminuir la concentración de iones metálicos hasta niveles de partes por billón.

El periódico **Expreso, de Cd. Obregón, Son. (2006)**, publicó un reportaje “La cáscara del camarón tiene usos que usted no imagina”, La cáscara de camarón figura 1.a, procesada genera componentes de alto valor agregado que pueden servir en la agricultura o en la industria alimenticia, industria de los cosméticos, como material biomédico y farmacéutico e incluso en el tratamiento de aguas residuales de cuya cáscara se puede obtener la quitina y el quitosano.

De acuerdo con **Xu-fen et al (2007)**, después de la celulosa, la quitina es un polisacárido comúnmente encontrado en las conchas de crustáceos tales como camarón, langostas, cangrejos e insectos. La jaiba o cangrejo azul, es un crustáceo decápodo que presenta

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

cinco pares de patas; su cuerpo está cubierto de un exoesqueleto de color verde oscuro. En los machos, las patas tienen un color gris-azulado, y es esta característica la que les ha dado el nombre común de jaiba azul. Sin embargo, en las hembras las puntas de las patas son de tonalidad rojizo-anaranjada.

Renault et al (2009) mencionan que el quitosano posee varias propiedades intrínsecas tales como ser no tóxico, su biodegradabilidad y su sorprendente comportamiento como agente quelante; las cuales lo hacen un coagulante y/o floculante eficiente para la remoción de contaminantes disueltos en el agua. Posee las características físico-químicas de los coagulantes y floculantes, por ejemplo, su alta densidad de carga catiónica y sus largas cadenas poliméricas, que conllevan la formación de puentes de agregados y la precipitación. Ya numerosos trabajos han demostrado que el quitosano y sus derivados puede ser sustitutos potenciales para las sales metálicas y polielectrolitos sintéticos en el tratamiento de aguas residuales para la remoción de sustancias particuladas y disueltas. Sin embargo, aún se necesitan más estudios para refinar la optimización de las propiedades de quitosano tales como el grado de desacetilación, el cual puede influir en la coagulación y el peso molecular.

Huang et al (2000) reportaron que el quitosano puede ser un sustituto con mucho potencial del alumbre en los procesos de coagulación, debido a su potencial como coagulante sin representar alguna amenaza a la salud como el aluminio residual y otros polímeros sintéticos. Las pruebas batch realizadas sugieren que el pretratamiento óptimo para preparar el coagulante de quitosano es la desacetilación con una solución 45% álcali por 60 minutos, seguidos por una disolución en 0.1% de ácido clorhídrico.

Bratskaya et al (2001) realizaron un estudio de las propiedades de floculación del quitosano en soluciones de sustancias húmicas. También se estudió el efecto de la adición de Fe^{3+} en la eficiencia de la floculación. Se concluyó que el quitosano puede ser usado como un floculante biodegradable muy efectivo en la remoción de sustancias húmicas. El quitosano mostró las mejores propiedades de floculación en un rango de pH de 6.5 a 7.5, donde se alcanzaron valores de remoción de color de hasta el 100%.

Divakaran y Pillai (2002) desarrollaron un estudio de floculación de limo en un río usando quitosano, en un rango de pH de 4-9, y la concentración de sólidos suspendidos en el

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

rango de 20-80 mg/l. Se observó que el quitosano reduce efectivamente la turbidez originada por el limo mediante floculación y sedimentación. El proceso de floculación es muy sensible al pH, siendo su óptimo un pH de 7; debido al pH neutro del proceso, no es necesaria la adición de químicos para ajustar el pH final del agua tratada, manteniendo así el bajo costo del tratamiento y una buena calidad del agua. La concentración óptima de quitosano fue de 0.5 mg/l, independientemente de la concentración de limo, dentro del rango examinado. Se observó la reestabilización de la suspensión con concentraciones elevadas de quitosano, y la cantidad requerida para la reestabilización se incrementa conforme aumenta la concentración de sólidos suspendidos. La floculación fue más rápida con altas concentraciones de limo y los flocs que se formaron fueron más grandes.

Guibal y Roussy (2006) usaron quitosano disuelto en ácido acético para la coagulación-floculación de un colorante aniónico. En soluciones ácidas los grupos amino protonados del quitosano atraen los grupos sulfónicos del colorante. El incremento en la dosis de quitosano incrementó la remoción hasta una concentración resultante en la completa neutralización de las caras aniónicas; por encima de esa, el exceso de cargas catiónicas conlleva la reestabilización de la suspensión. Por otro lado, la eficiencia del proceso se incrementa con la disminución del pH inicial de la solución con colorante: la relación molar entre las moléculas del colorante y los grupos amino respeta la estequiometría entre los grupos funcionales sulfónico y los grupos amino protonados, a un pH inicial de 5; con un pH inicial de 3 un posible fenómeno de agregación del colorante resulta en una relación molar mayor. El principal mecanismo de coagulación del colorante con quitosano parece ser la neutralización de cargas a un pH ácido.

Por su parte, **Bolto y Gregory (2007)** reportaron que también pueden ser utilizados polímeros naturales que tengan propiedades catiónicas inherentes, o que sean modificados para que tengan una carga positiva. Un ejemplo típico es el quitosano (obtenido de los caparazones de los crustáceos). Pese a que el quitosano es muy efectivo, su costo limita su uso en países en vías de desarrollo.

Rizzo et al (2008) comentan en su estudio que la coagulación, seguida por una cloración son típicamente los tratamientos usados para aguas superficiales para la potabilización. El quitosano, un polímero de elevado peso molecular, ha sido propuesto para la aplicación en el tratamiento del agua como una alternativa potencial a los coagulantes basados en

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

especies metálicas. Sin embargo, debido a su naturaleza, puede liberar materia orgánica durante la etapa de coagulación, incrementando así la concentración de los subproductos de desinfección, así como la toxicidad del agua tratada. En el estudio se comparó la eficiencia del quitosano y de los coagulantes convencionales (sulfato de aluminio y cloruro férrico), en términos de turbidez y remoción de materia orgánica natural. Durante la experimentación también se adicionaron ácidos húmicos, lo cual afectó la toxicidad final de diferentes maneras en los coagulantes; además, la etapa de cloración posterior a la coagulación incrementó la toxicidad siendo mayor para quitosano que para los otros coagulantes. Es por lo anterior que se concluyó que el uso de quitosano en el tratamiento convencional de agua potable puede resultar en un agua más tóxica comparada con los coagulantes convencionales dependiendo de las características del agua superficial.

Wang et al (2009) sintetizaron un floculante a base de quitosano para el tratamiento del agua residual proveniente de la industria de la celulosa. El coagulante natural se sintetizó mediante la incorporación de cloruro de trimetil amonio al quitosano. Los resultados experimentales mostraron que los dos problemas principales asociados al uso de quitosano como floculante, por ejemplo, el bajo peso molecular y su baja solubilidad en agua, fueron superados. Conforme se incrementó el porcentaje de incorporación, se mejoró la solubilidad del floculante en el agua; también de acuerdo a lo obtenido en los resultados, se concluyó que puede ser aplicado exitosamente en el tratamiento de aguas provenientes de la industria de la celulosa, debido a su excelente capacidad de floculación y a que su eficiencia es mucho mayor a la de la poliacrilamida.

Fabris et al (2010) encontraron que el quitosano no es muy eficiente para la remoción de carbono orgánico disuelto, pese a que tiene muchas ventajas para la aplicación en el tratamiento de aguas como su disponibilidad y su excelente capacidad para la remoción de turbidez. Su trabajo estableció que mientras el quitosano no es tan efectivo como un coagulante inorgánico para la remoción de carbono orgánico disuelto en el tratamiento de aguas residuales, es muy efectivo para la remoción de partículas suspendidas (turbidez) con dosis muy por debajo de aquellas requeridas para obtener un desempeño similar con coagulantes inorgánicos.

Ahmad et al (2011) reportaron un estudio sobre el proceso de coagulación de microalgas con quitosano. Pese a que los coagulantes químicos convencionales pueden tener

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

efectos negativos en la salud, el uso de quitosano como coagulante es adecuado para cultivar microalgas. El mecanismo de coagulación del quitosano parece consistir en adsorción y neutralización de cargas. De acuerdo a lo reportado, el quitosano no sólo actúa como un adsorbente, sino que también tiene un efecto coagulante para aglomerar las células de microalgas; es este proceso combinado el que hace del quitosano un buen coagulante, permitiendo la remoción de células de microalgas, incluso a bajas concentraciones. Sus resultados reportan una remoción efectiva del $99\pm 0.4\%$ de las células de microalgas con los siguientes parámetros: concentración de quitosano de 10 ppm, tiempo de mezclado de 20 min, velocidad de mezclado de 150 rpm y tiempo de sedimentación de 20 min. Se observó que un incremento en la concentración resultó en la reestabilización de las microalgas, consecuentemente reduciendo la eficiencia del proceso.

Zonoozi et al (2011) usaron quitosano en un estudio de dos etapas: la primera usando únicamente al quitosano como coagulante para la eliminación de los colorantes, y en la segunda se aplicó este material como coadyuvante junto al cloruro de polialuminio. De acuerdo a los resultados obtenidos por los investigadores, en la primera etapa las mejores eficiencias de remoción del colorante se obtuvieron en rangos de pH ácido (menor a 6); la remoción del 90% de los colorantes se logró con dosis de quitosano relativamente bajas (de 30-60 mg/L). En la segunda etapa, el uso del quitosano como coadyuvante mejoró de manera importante la eficiencia de remoción del cloruro de polialuminio, se demostró que pequeñas cantidades de quitosano (de 3 a 5 mg/L) pueden mejorar la eficiencia de remoción del cloruro de polialuminio hasta en 2.5 veces.

Altaher (2012) realizó una investigación sobre el uso del quitosano como coagulante en el pretratamiento de agua de mar. Uno de los problemas con los que se encuentra la industria desalinizadora es la baja calidad del agua de mar que reciben, sobre todo en época de lluvias. En tal condición, el agua llega a la planta con mucha turbidez. Se optó en el estudio por usar quitosano para la remoción de turbidez en vez de los coagulantes inorgánicos que conllevan efectos peligrosos. Se encontró que la eficiencia en la remoción de turbidez del quitosano fue mayor que la obtenida con el sulfato férrico, y equiparable a la del alumbre. De igual forma, se pudo observar que pese a que muchas investigaciones enfatizan el uso del quitosano en medio ácido o neutro, se obtuvieron buenos resultados en pH alcalino. La mayor eficiencia de remoción fue de 97.5% y se obtuvo a un pH de 8.1;

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

la dosis óptima fue de 18 mg/l. De acuerdo a las pruebas, se encontró que el quitosano disuelto en HCl tuvo un mejor desempeño que el disuelto en ácido acético. Se concluyó que se obtuvieron eficiencias de remoción comparables entre el quitosano y alumbre; sin embargo, se usaron dosis más elevadas con alumbre, lo cual implica con mayor costo y una mayor concentración de aluminio en el agua tratada.

Zemmouri et al (2012) mencionan que el quitosano ha sido utilizado como coagulante en el tratamiento de aguas para evitar problemas a la salud causados por el aluminio y polímeros residuales en el agua tratada. En su estudio trataron agua de la presa Keddara, la cual se caracteriza por su baja turbidez, usando quitosano como floculante y como coadyuvante al sulfato de aluminio. Los resultados mostraron que el quitosano no fue tan eficiente como el alumbre, cuando se usó como coagulante primario. Sin embargo, cuando el quitosano se aplicó como coadyuvante con el sulfato de aluminio, la remoción de turbidez alcanzó su mayor valor (97%); con una dosis de 0.2 mg/l de quitosano y después de 45 minutos de tiempo de sedimentación.

3.4 Aplicación de los lodos producidos

De acuerdo a **Ortiz et al (1995)** las técnicas que han sido utilizadas para el tratamiento y la disposición final de residuos sólidos en otros países y que pueden aplicarse al manejo de lodos residuales en México son las siguientes: tratamientos anaerobio y aerobio, disposición en suelos, tratamientos térmicos (pirólisis e incineración) y confinamiento controlado. Por su bajo costo, simplicidad y beneficios para la agricultura, la mayor parte de los lodos se utilizan como mejoradores de suelo y solamente algunos se confinan o se incineran, ya que estos últimos métodos presentan riesgos difícilmente aceptables por la comunidad; en el caso de los confinamientos, la contaminación de acuíferos y en el de la incineración, emisiones a la atmósfera y la generación cenizas peligrosas.

El uso de lodos residuales como mejoradores de suelos con o sin tratamiento previo, dependiendo de las condiciones particulares de cada caso, presenta las siguientes ventajas:

1. Se aportan al suelo los nutrimentos que el lodo contiene y que son elementos esenciales para el crecimiento de las plantas
2. La materia orgánica mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, tales como estructura, permeabilidad y poder de amortiguamiento.

Según **Oropeza (2006)**, en México el manejo de lodos residuales municipales e industriales es un aspecto descuidado y son pocas las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que cuentan con un sistema de tratamiento de lodos, además, no existen cifras exactas referentes a la cantidad de lodos generados a nivel municipal y mucho menos por giro industrial. El problema no termina aquí, ya que los lodos residuales deben disponerse de forma ambientalmente segura.

De acuerdo a este mismo estudio, recientemente se han realizado análisis en los que se evidencia que los lodos residuales en México son un grave problema; aunque pueden ser reutilizados sin riesgos a la salud y al ambiente, ha sido demostrado que incrementan del 10 al 85% el rendimiento de los cultivos en relación con fertilizantes comunes, así, estos desechos podrían ser aprovechados después de ser sometidos a diversos procesos de estabilización, generando biosólidos que podrían aplicarse como fertilizante dependiendo de las características del suelo y la calidad de los biosólidos obtenidos. El principal problema es la alta concentración bacteriana que presentan y el contenido de metales residuales; convirtiéndolos en residuos peligrosos que deben ser confinados o incinerados, en vez de aprovecharse para mejorar el suelo de dos terceras partes del territorio nacional que presentan problemas de salinidad y alcalinidad, es decir, altos contenidos de sales y sodio. El uso de coagulantes naturales que no representen la adición de metales en la etapa de tratamiento del agua, supone una de las alternativas a tomar en cuenta para el mejoramiento de la calidad de los lodos producidos.

No se encontró en la revisión bibliográfica información sobre el uso de los lodos producidos en el proceso de coagulación-floculación con coagulantes naturales. Sin embargo, derivado de esa misma revisión, se tienen grandes expectativas de su posible uso (posterior a su tratamiento y adecuación) en el mejoramiento de suelos, como abono y como fertilizantes; ya que a diferencia de las sales metálicas usadas comúnmente, éstos no aportarían metales residuales a los lodos generados.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Al igual que en el resto del mundo, la crisis del agua en México se debe, entre otras cosas, al incremento y concentración de la población. El desarrollo económico del país ha permitido el crecimiento de las redes de agua potable y drenaje, y un aumento en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales que permiten tratarlas hasta niveles aceptables. Es de esperarse que el empleo de estas aguas en la agricultura, riego de parques, jardines y recarga de acuíferos vaya en aumento (Rojas y Mendoza, 2012).

4.1 Tratamiento de aguas residuales

Toda agua contiene una mezcla heterogénea de sustancias orgánicas no bien definidas, entre las cuales se encuentran las siguientes:

1. **Compuestos húmicos:**

- Ácidos acuáticos que constituyen básicamente el color. La fracción húmica la forman principalmente el ácido húmico y el ácido fúlvico, que son polielectrolitos aniónicos con un grado de ionización que depende del pH, por lo que en la remoción de estas sustancias el pH es un factor dominante. Se trata de compuestos bastante heterogéneos y no bien conocidos que se caracterizan por parámetros no específicos, como su solubilidad en álcalis o en ácidos, su contenido de carbono orgánico, su absorbancia de los rayos UV, etc., y constituyen a veces hasta el 50% de la materia orgánica natural.
- Algas y su material extracelular, extraídos especialmente de organismos como la anabaena, que por fotosíntesis producen material orgánico, en su mayoría constitutivo del color.
- Vegetación en contacto con la fuente: hojas, pastos, maderas que al descomponerse introducen compuestos como lignina, taninos y otras moléculas orgánicas que pueden aparecer como color.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

2. **Compuestos no húmicos:**

- Desagües domésticos que introducen material orgánico, como proteínas, aminoácidos, carbohidratos, etc., entre otros.
- Lixiviados de basuras o basuras orgánicas, cuando son descargadas directamente en las fuentes.
- Desechos industriales o agrícolas, como pulpa de café (que produce también color), desagües de porquerizas residuos de los procesos de fabricación como fenoles, bromuros, etc.
- Los compuestos húmicos al estar constituidos por coloides hidrofóbicos de alto peso molecular, pueden ser más fácilmente removidos que los no húmicos, que son hidrofílicos y de bajo peso molecular en la mayoría de los casos, los cuales requieren grandes dosis de coagulantes.

Las sustancias anteriores reciben el nombre genérico de materia orgánica natural, que se determina como carbono orgánico total (COT), y carbono orgánico disuelto (COD). El primero es la medición de la totalidad del carbono de origen orgánico presente en la muestra, y el segundo está constituido por la materia orgánica, moléculas y macromoléculas capaces de pasar por los poros de una micromembrana de 0.45 μm , y por lo tanto, constituyen la fracción soluble del COT. También puede expresarse como carbono orgánico no purgable, que es el carbono presente en la fracción del carbono total, que permanece en la muestra después de que el CO_2 ha sido purgado de ella en condiciones ácidas.

El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente.

El tratamiento primario se emplea para la eliminación de los sólidos en suspensión y los materiales flotantes, impuesta por los límites, tanto de descarga al medio receptor como para poder llevar los efluentes a un tratamiento secundario, directamente o pasando por una neutralización u homogeneización. El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales. En cuanto al tratamiento terciario, su objetivo fundamental es la eliminación de contaminantes que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales (Ramalho, 1996).

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

4.1.1 Tratamiento primario

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales o la serie de procesos de tratamiento, dependen de un cierto número de factores, entre los que se incluyen:

- a) Características del agua residual: DBO, materia en suspensión, pH, productos tóxicos.
- b) Calidad del efluente de salida requerido.
- c) Costo y disponibilidad de terrenos, por ejemplo, ciertos tratamientos biológicos son económicamente viables únicamente en el caso de que se disponga de terrenos de bajo costo.
- d) Consideración de las futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertido más estrictos, que necesiten el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro.

Los pre-tratamientos de aguas residuales implican la reducción de sólidos en suspensión o el acondicionamiento de las aguas residuales para posteriormente pasar un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogeneización. Los tipos fundamentales de tratamientos primarios son: el cribado, la sedimentación, la flotación, la neutralización y homogeneización.

Tabla 4.1: Ejemplos de tratamientos primarios

Tratamiento primario
Cribado o desbrozo
Sedimentación
Flotación
Separación de aceites
Homogeneización
Neutralización

4.1.2 Tratamiento secundario

Esta etapa consiste en la eliminación de la materia orgánica presente en el agua residual, comprende todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios. Entre estos procesos, se encuentra el de lodos activados, que ha sido utilizado para el tratamiento de las aguas residuales tanto industriales como urbanas desde hace aproximadamente un siglo. El diseño de las plantas de lodos activos se llevó a cabo fundamentalmente de una forma empírica. Sólo al comienzo de los años

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

sesenta se desarrolla una solución más racional para el diseño del sistema de lodos activados. Este proceso nació de la observación realizada hace mucho tiempo de que si cualquier agua residual, urbana o industria, se somete a aireación durante un período de tiempo se reduce su contenido de materia orgánica, formándose a la vez un lodo floculento.

Tabla 4.2 Ejemplos de tratamientos secundarios.

Tratamiento Secundario
Lodos activados
Aireación prolongada (procesos de oxidación total)
Estabilización por contacto
Otras modificaciones del sistema convencional de lodos activados: aireación por fases, mezcla completa, aireación descendente, a alta carga, aireación con oxígeno puro
Lagunaje con aireación
Estabilización por lagunas
Filtros biológicos (percoladores)
Discos biológicos
Tratamientos anaerobios: procesos de contacto, filtros (sumergidos)

4.1.3 Tratamiento terciario

Esta etapa se conoce también como tratamiento avanzado, es la serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional. Muchos de estos procesos actualmente no se emplean demasiado en el tratamiento de las aguas residuales, pero su empleo a mayor escala está previsto conforme las exigencias de calidad de los efluentes se hagan más estrictas en el futuro.

Tabla 4.3 Ejemplos de tratamientos terciarios o avanzados.

Tratamiento Terciario o “Avanzado”
Microtamizado
Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas)
Precipitación y coagulación
Adsorción (carbón activado)
Intercambio iónico
Ósmosis inversa
Electrodialisis
Cloración y ozonización
Proceso de reducción de nutrientes
Otros

4.2 Coagulación – Floculación

El re-uso y reciclaje del agua es una estrategia necesaria para la sustentabilidad de las actividades económicas que involucran a este recurso (Ortiz, 2005). Sin embargo, un tratamiento apropiado es necesario para asegurar la alta eficiencia, costo bajo y protección del ambiente en el uso del agua tratada (Arreguín y Mejía, 2006). Entre las diferentes alternativas, el proceso de coagulación/floculación/sedimentación, conocido también como un tratamiento primario avanzado (Rodríguez et al., 2007), es un proceso universal debido a que disminuye la turbidez al eliminar una gran cantidad de sustancias de varios tamaños de partícula, a un costo más bajo que otros métodos (Murillo, 2009). Las etapas posteriores del tratamiento de aguas dependen en gran parte del éxito del proceso de coagulación/floculación/sedimentación. (Kaewdannetra, et al., 2009).

Muchas de las impurezas en el agua residual se presentan como sólidos coloidales que no pueden sedimentarse, estas partículas finas que se encuentran dispersas y suspendidas producen turbidez y color en el agua que no pueden ser eliminados por sedimentación ordinaria. La turbidez es considerada un parámetro importante para evaluar la calidad de un cuerpo de agua, ya que indica la calidad en términos de concentración de partículas coloidales (Harris, 2007). Entre más partículas haya en el agua, ésta es más turbia (Yan et al., 2008). Por lo tanto, es importante promover la desestabilización de estas partículas mediante el uso de coagulantes catiónicos (Simina et al., 2009). Estas partículas generalmente poseen cargas eléctricas negativas. Sus diámetros oscilan entre 10^{-4} y 10^{-6} mm (Fig. 4.1); y están rodeadas de una doble capa eléctrica (capa difusa y capa de Stern), las cuales previenen que haya contacto entre ellas.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

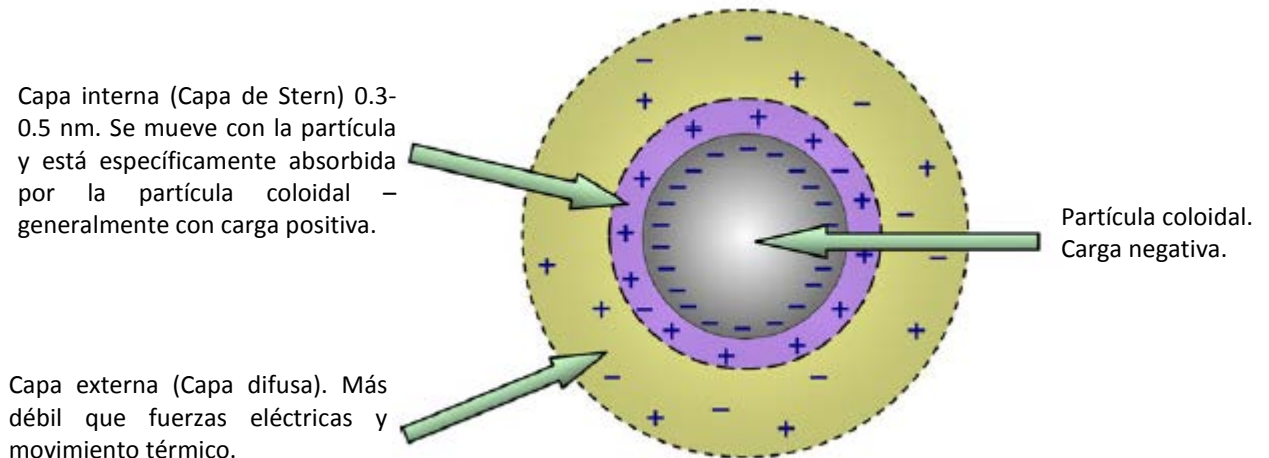


Figura 4.1 Carga eléctrica que rodea a una partícula.

Es importante distinguir dos aspectos fundamentales en la coagulación-floculación del agua:

- La desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la reducción de las fuerzas que las mantienen separadas.
- El transporte de ellas dentro del líquido para que hagan contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de coágulos porosos.

El primer aspecto es conocido como coagulación, y el segundo como floculación.

Los procesos de coagulación y floculación consisten en la desestabilización de las partículas coloidales (coagulación) y posterior aglutinación de las partículas suspendidas formando pequeñas masas (floculación) con un peso específico superior al del agua, denominadas flocs, que les permite sedimentar. Para poder abordar el tema de la coagulación y floculación, es necesario hablar brevemente sobre las impurezas del agua que hacen de la coagulación y floculación un proceso necesario en el tratamiento del agua. Este proceso se utiliza para:

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

- 1) Remoción de turbidez orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- 2) Remoción de color verdadero y aparente.
- 3) Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- 4) Destrucción de algas y plancton en general.
- 5) Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos entre otros.

Mediante la adición de un coagulante (generalmente con carga positiva) y la mezcla del agua, se causa la compresión de la doble capa y de esa manera la neutralización del potencial electrostático de la superficie de las partículas.

El proceso de coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua, y dura sólo fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua.

En el primer proceso pueden actuar tres mecanismos diferentes: el de adsorción-desestabilización basado en las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión, el del puente químico que establece una relación de dependencia entre las fuerzas químicas y la superficie de los coloides; y el de sobresaturación de la concentración de coagulantes en el agua.

La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras para formar coágulos mayores.

Para la floculación, por su parte, se puede distinguir entre floculación ortocinética y pericinetica, o con escala de turbulencia por encima o por debajo de la microescala de Kolmogoroff. La primera mencionada es la inducida por la energía comunicada al líquido por fueras externas (paletas giratorias, por ejemplo). La segundo es la promovida, internamente dentro el líquido, por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro del mismo (movimiento browniano) y se realiza en un tiempo muy corto después de

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

desestabilizada la partícula hasta que ésta tiene un tamaño que se acerca a la microescala de Kolmogoroff.

En la práctica, en una primera etapa se realiza la mezcla rápida por pocos segundos, esta es importante después de la adición del coagulante para asegurar una dispersión uniforme y también para incrementar la oportunidad del contacto entre partículas. Después de la mezcla rápida, un mezclado lento prolongado (de por lo menos 15 minutos) ayuda a la formación de flocs. Estos flocs se hacen lo suficientemente grandes para sedimentar por gravedad, y posteriormente pueden ser eliminados por filtración.

4.2.1 Turbidez

La turbidez es la propiedad óptica que tiene una sustancia líquida o sólida, de diseminar en todas direcciones la luz que pasa por ella. Sólo cuando la luz pasa por un líquido ideal homogéneo, no se produce diseminación ninguna del rayo luminoso y, por lo tanto, la turbidez es cero. La turbidez está principalmente formada por arcillas en dispersión, este último término comprende una gran variedad de compuestos, pero en general se refiere a tierra fina (0.002 mm de diámetro o menos), a veces de algún color, que adquiere plasticidad al mezclarse con limitadas cantidades de agua. Químicamente, éstas son silicatos de aluminio con fórmulas bastante complejas, que se muestran a continuación.

- Caolinita $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$ y $(Al_4(Si_4O_6)(OH)_{16})$
- Bentonita $Al(Si_8O_{20})(OH)_4 \cdot H_2O$
- Illita $Al_4[Fe_4, Mg_4, Mg_{16}]$
- Muscovita $K_2Al_4(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$

Los factores que influyen la turbidez son el número, concentración y masa de las partículas, así como su tamaño, forma e índice de refracción.

1. **Número de Partículas.** El número de partículas es siempre proporcional a la turbiedad, en suspensiones monodispersas ideales. En cambio, en el caso común de suspensiones polidispersas, el problema es más complejo. Si la partícula es pequeña comparada con la longitud de onda de la luz (un tamaño menor a 1/20 de la longitud de onda), las amplitudes pueden considerarse aditivas y la luz diseminada se hace proporcional al número de partículas presentes, a su masa y a su volumen. Esta propiedad puede usarse para

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

determinar la concentración de una solución, comparándola con la turbiedad de otra solución de concentración conocida.

Cuando las partículas, en cambio, son de escala mayor de $\lambda/20$, la luz diseminada no puede considerarse como una función lineal del número de ellas o de su concentración. Esto último es la razón del por qué la turbidez no se expresa en términos de ppm o mg/L, sino en unidades NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

2. **Tamaño de las Partículas.** El tamaño de las partículas influye también en la cantidad de luz diseminada y el ángulo en el cual se produce mayor diseminación. Para partículas pequeñas en que el diámetro es mucho menor que la longitud de la onda luminosa ($d \ll \lambda$), la luz total diseminada es proporcional a $1/\lambda$ y por tanto, cualquier variación en el tipo de luz incidente, producirá una diferente lectura de la turbidez, puesto que lo varía con la cuarta potencia de λ para el mismo diámetro.
3. **Índice de Refracción.** El índice de refracción de las partículas θ y el del líquido θ_0 , influye en la relación de la luz incidente I_0 y la luz diseminada I_D , relación que puede expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{I_D}{I_0} = f(\theta - \theta_0)^2$$

Por lo tanto, las variaciones de θ_0 del líquido de la suspensión, afectan la lectura de la turbidez en proporción al cuadrado de dicha variación. Es importante por esto que cuando se hace su medición, mantener el agua libre de burbujas de aire, pues éstas tienen un índice de refracción diferente al del líquido que las rodea.

4.2.2 Color

La aparición de color en el agua puede deberse a:

- a) La extracción producida por el agua de sustancias provenientes de maderas.
- b) La solución de productos de descomposición de las maderas.
- c) La solución de materia orgánica del suelo.
- d) La combinación de los procesos antes mencionados.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Sin importar el origen, el conjunto de compuestos responsables del color, reciben el nombre de sustancias húmicas. Si bien la estructura molecular de dichas sustancias no es bien conocida, se sabe que básicamente contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en porcentajes variables, y que muestran propiedades ácidas con pesos moleculares que van desde 200 hasta más de 50000 se pueden clasificar en cuatro fracciones, que se explican en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Características de las sustancias productoras de color en el agua.

Sustancias	% Proporción en el agua	Solubilidad	Peso Molecular	Composición %		
				C	H	N
Ácido fúlvico	58-86	Soluble en álcali, no precipita en ácidos.	-	54.87-59.32	5.56-6.47	0.57-2.41
Ácido húmico	3.8-16.2	Soluble en álcali precipita con HCl insoluble en alcohol.	<50 000	39.00-51.00	4.52-4.80	11.86-22.39
Ácido himatomelánico	10.2-32.2	Soluble en álcali precipita con HCl insoluble en alcohol.	800	-	-	-
Carbón húmico	-	Insoluble en álcali	-	-	-	-

La separación de estos compuestos se puede hacer agregando HCl al extracto de color obtenido de acuerdo a procedimientos ya establecidos. Se produce así un precipitado que decanta. La parte líquida es ácido fúlvico. A la parte sólida se le agrega alcohol etílico y se obtiene así un nuevo precipitado, que es el ácido húmico y un líquido que es el ácido himatomelánico. El carbón húmico es la fracción del color que no precipita en álcali.

Existe una relación entre el color y el pH, en general, al subir el pH se incrementa el color, pero el mayor incremento se obtiene con aguas que tienen originalmente un color bajo.

4.2.3 Coloides: clasificación y propiedades

Los sistemas coloidales pueden dividirse como moleculares y micelares (no moleculares), liofílicos y liofóbicos, diurnos y caducos, y en orgánicos e inorgánicos.

- **Moleculares.** Están constituidos por polímeros, con pesos moleculares muy grandes tamaños entre 10^2 y 5×10^2 μm . Ejemplos de estos son la gelatina, las proteínas y el almidón; los cuales no constituyen soluciones, sino coloides.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

- **Micelares.** Pueden formarse por asociación de moléculas más pequeñas de minerales (por ejemplo el oro) o compuestos orgánicos (jabones, detergentes), que espontáneamente se aglutinan en presencia de un dispersante en partículas de tamaño coloidal.
- **Liofílicos.** Cuando se refiere al agua, se conocen como hidrofílicos; están constituidos por las dispersiones moleculares de sustancias poliméricas o sustancias aglutinadas en tamaño coloidal, que tienen una fuerte atracción por el solvente, y reaccionan químicamente con el agua, en la cual se encuentran dispersos. Ejemplo de estos son los jabones y la materia orgánica encontrada en las aguas residuales. Su estabilidad depende de la capa de hidratación que los rodea en la cual hay moléculas de agua adheridas que actúan como barrera, impidiendo el contacto entre las partículas.
- **Liofóbicos.** Están formados por sustancias insolubles en el solvente, por ejemplo las arcillas y metales; y por lo anterior son mucho más inestables que los liofílicos. Son el tipo de dispersiones que más interesa en el tratamiento del agua potable.
- **Diuturnos.** Su nombre significa de larga duración, son aquellos que no se modifican o se aglutinan durante mucho tiempo, en comparación con el período de observación.
- **Caducos.** Son, al contrario, los transitorios que se aglutinan o cambian rápidamente.
- **Orgánicos e inorgánicos.** Los coloides pueden ser orgánicos como las proteínas o las grasas, o inorgánicos como el oro o las arcillas minerales.

Entre las propiedades más importantes de los coloides se encuentran las mostradas en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Propiedades de los coloides.

Propiedades Cinéticas	Movimiento Browniano Difusión Presión Osmótica
Propiedades Ópticas	Efecto Tyndall – Faraday Coloración
Propiedades de Superficie (Adsorción)	
Propiedades Electrocinéticas	

Movimiento Browniano. Una de las propiedades que más distingue las dispersiones coloidales es el hecho de que no pueden sedimentar, incluso cuando las partículas son

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

más densas que el líquido en el que se encuentran. Si una suspensión de las mismas es observada con ayuda de un microscopio, se puede notar que están movimiento constante y desordenado. La causa de este movimiento se debe a las moléculas del líquido en el cual están inmersas.

Difusión. El movimiento incesante mencionado anteriormente, hace que las partículas coloidales se difundan, distribuyéndose uniformemente en el solvente. La velocidad de difusión es mucho menor que la velocidad media de la partícula en el movimiento Browniano. En cuanto más grande sea el tamaño de la partícula, la velocidad de difusión será menor.

Presión Osmótica. Debido al movimiento Browniano, si la concentración de partículas en un líquido no es uniforme, se produce un flujo de material desde las zonas de alta concentración hacia las de baja concentración hasta alcanzar un equilibrio. Esta es la razón por la cual, si se introduce una celda hecha de una membrana semipermeable que contenga cierta dispersión coloidal, en un líquido puro, éste trata de introducirse dentro de ella, para alcanzar un equilibrio. El incremento de volumen produce la presión osmótica.

Efecto Tyndall – Faraday. Cuando un rayo de luz es diseminado al pasar a través de una suspensión coloidal, la diseminación del mismo es proporcional al tamaño de las partículas. Si se usa un rayo bien definido se puede observar claramente un cono de luz. Este fenómeno se conoce como efecto Tyndall – Faraday, y puede observarse cotidianamente cuando un rayo de luz penetra en una habitación oscura donde loan partículas de polvo.

Coloración. Los coloides son primariamente incoloros, sin embargo, las suspensiones coloidales aparecen con una cierta coloración; esto puede deberse a la diseminación de la luz o a la absorción selectiva por el coloide de una cierta longitud de onda.

Propiedades de Superficie. Cuando la materia se subdivide hasta llegar al tamaño coloidal se produce un gran incremento del área, ésta enorme superficie de la partículas tiene la tendencia de adsorber; este fenómeno e puede definir como el proceso por el cual cierta cantidad de sustancia es extraída de una fase (líquida) y concentrada en la superficie de un sólido. Para que la adsorción se lleve a cabo se necesita que el adsorbido tenga una baja solubilidad en el agua y que exista una afinidad especial del soluto por el sólido (coloide) en el cual queda adsorbido. Una vez que el soluto se ha

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

transportado a la superficie del coloide queda adherido a ella debido a fuerzas físicas (fisisorción) y químicas (quimisorción).

Propiedades Electrocinéticas. Ha sido observado que las partículas de una dispersión coloidal se mueven de un polo de determinado signo a otro, al estar sometidas a un campo eléctrico, lo que demuestra que poseen una carga electrostática. Dicha carga primaria de los coloides se debe, principalmente a la ionización y a la adsorción preferencial.

La ionización se origina debido a que muchos coloides naturales contienen en la superficie grupos químicos (carboxilos, hidroxilos, etc.) que pueden ionizarse dando origen a cargas eléctricas. La adsorción preferencial, por su parte, se debe a que los coloides pueden también cargarse por adsorción de iones en su superficie.

Esta carga mencionada anteriormente produce una fuerza repulsiva, que impide la aglomeración o coagulación de las partículas cuando están en contacto. Las dos fuerzas que deben tenerse en cuenta son las fuerzas de repulsión coulómbicas, y las de atracción de Van der Waals. Las primeras se observan cuando dos partículas de igual signo se aproximan, y la segunda se debe principalmente al movimiento continuo de los electrones en sus órbitas, creando un campo magnético que fluctúa constantemente ejerciendo influencia sobre los electrones de la materia circundante. Estas son siempre atractivas y se dan entre partículas de carga opuesta, de carga neutra e incluso entre partículas con la misma carga (Arboleda, 2000).

4.2.4 Mediciones electrocinéticas

Para estimar el potencial en la superficie del conjunto partícula-contrainones, que se transportan unidos dentro del líquido cuando se los somete a un campo eléctrico, se suele medir el desplazamiento diferencial y por él calcular el potencial en el plano de cizalla, o potencial Z, que será un poco inferior al de Stern. Para poder determinar el potencial Z se suelen efectuar tres tipos de mediciones electrocinéticas:

1. La electroforesis.
2. La electroósmosis.
3. El potencial de corriente.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Si las partículas coloidales se mueven en un campo eléctrico, llevando parte de la doble capa consigo, esto es electroforesis. Si la superficie cargada se mantiene quieta, como por ejemplo la pared de vidrio de la celda, la aplicación de un campo eléctrico en la suspensión hará que las partículas cerca de la pared se mueven, arrastrado con ellos el líquido; esto es electroósmosis. Igualmente, si el líquido que contiene partículas se mueve a lo largo de un pistón; esto es potencial de corriente. La figura 4.2 aclara estos conceptos.

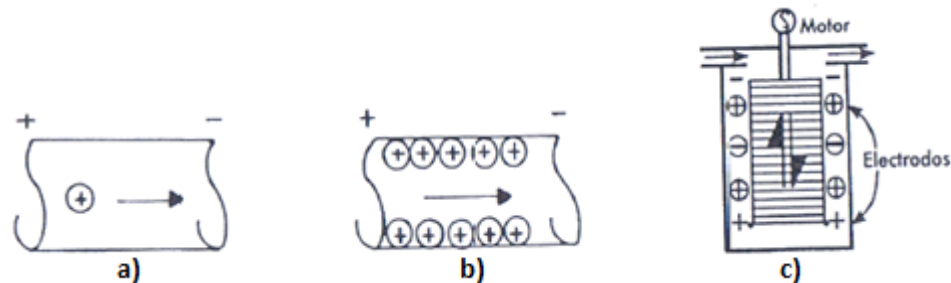


Figura 4.2 a) Electroforesis, partículas que se mueven en un líquido sin movimiento. b) Electroósmosis, partículas sin movimiento en un líquido en movimiento. c) Potencial de corriente, líquido se mueve, diferencia de potencial en el pistón.

La electroforesis es el procedimiento más empleado para medir el potencial Z y con menos frecuencia, el potencial de corriente. La electroforesis se puede hacer básicamente de dos formas: con un equipo para medir el potencial Z y con la celda de Briggs. En todos los casos, la suspensión coloidal cuyo potencial quiere ser medido, se coloca en una celda capilar con electrodos en los extremos, la cual va montada sobre un microscopio, provisto de retículos calibrados. Se aplica una determinada corriente a dichos electrodos, para crear una diferencia de potencial se mira con el microscopio la velocidad con que las partículas se desplazan entre los retículos. Esta medición se tiene que hacer en el punto de la celda en que el movimiento del agua por efectos térmicos, es cero. Como la velocidad con que la partícula se traslada guarda relación con el mayor o menor potencial Z que ella posea:

$$v = \frac{ZD_c}{4\pi\mu}$$

En donde la velocidad se expresa en cm/seg, y μ es la viscosidad absoluta del agua en poises. Despejando se tiene:

$$Z = \frac{4\pi\mu v}{D_c}$$

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

En la mayoría de los casos, la movilidad electroforética “ v ” se expresa en $\mu\text{s/v/cm}$, o sea, micras por segundo por volt centímetro, dando así simultáneamente la velocidad de traslación de la partícula y el gradiente del potencial del campo. Para un líquido dado y a una temperatura determinada:

$$\frac{4\pi\mu}{D_c} = \text{constante} \quad \therefore Z = \text{constante} \cdot v$$

4.2.5 Potencial Zeta

El potencial Zeta es una medida de la estabilidad de una partícula e indica el potencial que se requiere para penetrar la capa de iones circundante en la partícula para desestabilizarla. Por lo tanto, el potencial zeta es el potencial electrostático que existe entre la separación de las capas que rodean a la partícula.

Se usa el modelo de la doble capa para visualizar la atmósfera iónica en la proximidad de la partícula o del coloide cargado y para explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de repulsión. Es posible entender este modelo como una secuencia de etapas que ocurren alrededor de un coloide negativo, si los iones que neutralizan sus cargas son repentinamente separados, los cuales se muestran en la Figura 4.3, donde la vista izquierda muestra el cambio en la densidad de carga alrededor del coloide y la derecha muestra la distribución de iones positivos y negativos alrededor del coloide cargado. (Zeta-Meter Inc., 1993).

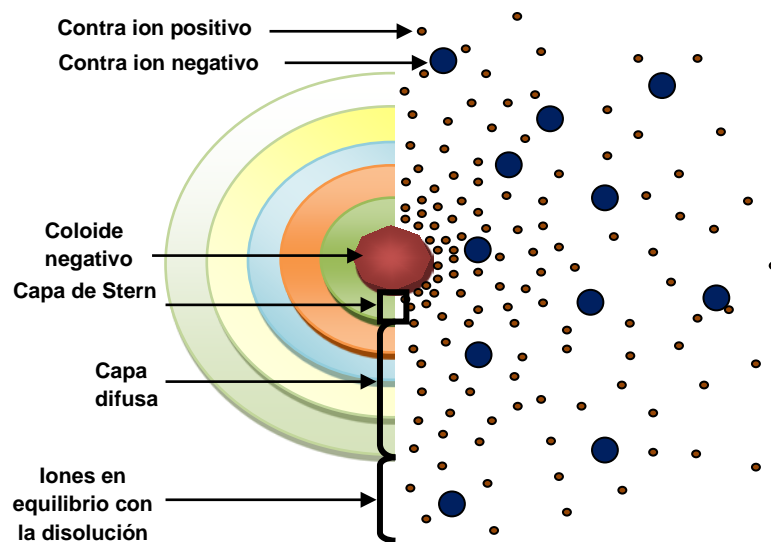


Figura 4.3 Capa Difusa.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

El efecto del colóide sobre el ion positivo (llamado contraion) en la solución inicial con la atracción del colóide negativo hace que algunos iones positivos formen una rígida capa adyacente alrededor de la superficie del colóide; esta capa de contraiones es conocida como la capa de Stern.

Otros iones positivos adicionales son todavía atraídos por el colóide negativo, pero estos son ahora rechazados por la capa de Stern, así como otros iones positivos que intentan acercarse al colóide. Este equilibrio dinámico resulta en la formación de una capa difusa de contraiones, éstos tienen una alta concentración cerca de la superficie, la cual disminuye gradualmente con la distancia, hasta que se logra un equilibrio con la concentración de los contraiones en el seno de la disolución. En forma similar, aunque opuesta, en la capa difusa hay un déficit de iones negativos, llamados coiones pues tienen la misma carga que el colóide. Su concentración se incrementa gradualmente al alejarse del colóide, mientras que las fuerzas repulsivas del colóide son compensadas por los iones positivos, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio.

La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al colóide. A cualquier distancia de la superficie, la densidad de carga es igual a la diferencia de concentración entre iones positivos y negativos. La densidad de carga es mucho mayor cerca del colóide y gradualmente disminuye a cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se asemejan.

Los contraiones de la capa de Stern y de la capa difusa son los que juntos se denominan la doble capa. El espesor de esta doble capa depende del tipo y concentración de los iones de la solución.

El colóide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución. Este tiene su valor máximo en la superficie y disminuye gradualmente con la distancia, aproximándose a cero fuera de la capa difusa. La caída del potencial y la distancia desde el colóide es un indicador de la fuerza repulsiva entre los coloides en función de la distancia a las cuales estas fuerzas entran en juego.

Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el *potencial zeta*, el cual es importante porque puede ser medido de una manera muy simple, mientras que la carga de la superficie y su potencial no pueden medirse. El potencial zeta puede ser una manera efectiva de controlar el

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

comportamiento del coloide puesto que indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides. La relación entre el potencial zeta y el potencial de superficie depende del nivel de iones en la solución. Así, en el agua, la doble capa hace que el potencial zeta sea una buena aproximación del potencial de superficie.

4.2.6 Mecanismos de coagulación

4.2.6.1 Coagulación por neutralización de cargas

La neutralización de las cargas de coloides liofóbicos, puede hacerse según Mackrle:

- Por cambio de la concentración de los iones que determinan el potencial del coloide.
- Por la adsorción de iones que posean una carga opuesta a las de los iones determinantes de potencial, y que sean capaces de reemplazar a éstos en la capa de Stern.

Como se muestra en la figura 4.4, se sabe que los coloides pueden adsorber:

- Iones o productos de hidrólisis simples como el Al(OH)^{++} , o el Fe(OH)^{++} ; con pesos moleculares entre 44 y 135 g/mol, y tamaños menores de $1 \mu\text{m}$, que se forman al inicio de la coagulación.
- Polímeros formados poco más tarde, al continuar las reacciones hidrolíticas del coagulante con la alcalinidad y con el agua. Estas moléculas alcanzan pesos entre 256 (Cuando OH:Al es igual a 0.5) y 1430 (cuando OH:Al es igual a 0.25). el tamaño de estos polímeros es de alrededor de $1 \mu\text{m}$, y tienden a ser octaédricos (Arboleda, 2000).

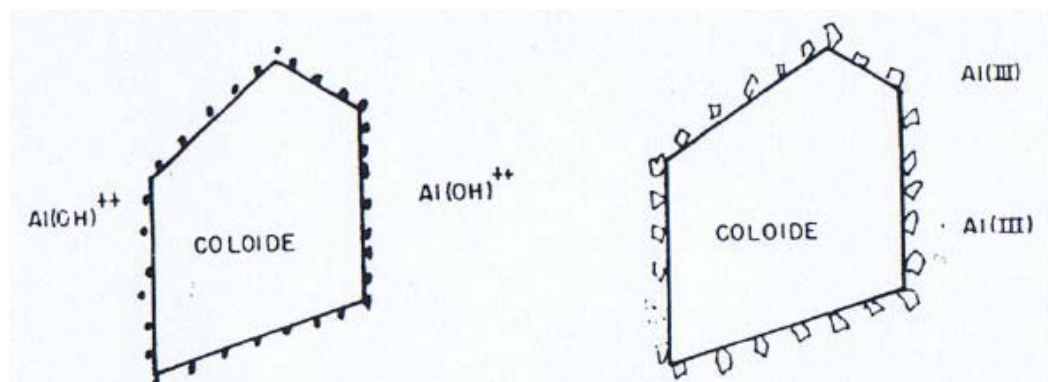


Figura 4.4 Adsorción de contraiones en la partícula coloidal. a) Iones o productos de hidrólisis simples; b) Polímeros de Al(III) y Fe(III).

4.2.6.2 *Coagulación por Compresión de la Doble Capa*

Cuando se incrementa la concentración del electrolito se incorporan contraiones en la capa difusa (también conocida como capa de Gouy-Chapman), con la cual ésta se represa y se disminuye la magnitud de las fuerzas repulsivas, permitiendo la eliminación de la barrera de energía. Por eso, la adición de una sal neutra (electrolito indiferente), no cambia el potencial del coloide pero altera la forma de la curva de las fuerzas coulombicas, disminuyendo la distancia hasta la cual son efectivas.

La reducción del espesor de la doble capa, sin embargo, es más importante que la reducción del potencial zeta hasta el punto isoeléctrico ($\zeta=0$). La adsorción de contraiones puede ser un fenómeno electrostático o químico. Si el fenómeno es puramente electrostático y lo que se agrega son contraiones en la capa difusa, los iones más pequeños podrán acercarse más a la superficie de la partícula y no se fijarán a puntos de adsorción determinados, sino que flotarán libremente a su alrededor. En este caso:

- a) La coagulación se produce cuando el potencial zeta se hace cero.
- b) El exceso de coagulantes agregados no puede producir estabilización de la suspensión, pues los coloides no pueden adsorber más contraiones de los que su carga primaria lo permite.
- c) Entre mayor sea la carga del contraión, más disminuirá la carga del coloide de acuerdo con la Ley de Schulze Hardy, la cual dice “La precipitación de un coloide es efectuada por aquel ion del electrolito añadido, que tenga una carga opuesta en signo a la de las partículas coloidales y el efecto de dicho ion se incrementa cuanto mayor sea el número de cargas que posea”.

De acuerdo con esta ley, se ha encontrado que un ion bivalente es de 30 a 60 veces más efectivo que un ion monovalente; y un ion trivalente, de 700 a 1000 veces más efectivo que un ion monovalente. Lo anterior se debe a que mientras más fuerte sea la carga eléctrica del contraión, más rápidamente neutraliza la partícula. Ahora bien, como los productos de la hidrólisis del Al(III) y el Fe(III) tienen cargas que van desde +5 hasta -1, la cantidad de coagulante que debe ser agregado a una suspensión dependerá más de la carga de los productos de hidrólisis que se formen que del número de partículas de la suspensión (Arboleda 2000).

4.2.6.3 Coagulación por Puente Químico

Si la adsorción de contraiones es debida a fuerzas químicas se establecerán enlaces de hidrógeno, covalentes, iónicos, etc.; entre las moléculas adsorbidas y las superficies de los coloides, en cuyo caso éstas quedarían adheridas a puntos fijos de adsorción y su número podrá aumentar hasta cambiar la carga del coloide (de negativa a positiva) con lo que se producirá su estabilización. Por otra parte, entre más puntos de adsorción disponibles haya (más superficie que cubrir), más moléculas capaces de ser adsorbidas (coagulantes) hay que agregar y serán más fácilmente adsorbidos los polímeros grandes que los pequeños.

Esto explica por qué no siempre la coagulación se realiza a potencial zeta=0, puede incluso no producirse, si las dosis son muy altas: debido a que en lugar de adsorción electrostática se ha producido adsorción química.

Las moléculas poliméricas de alto peso molecular (o sea las compuestas por largas cadenas de iones) pueden ser adsorbidas químicamente en las partículas coloidales como se esquematiza en la Fig. 4.5, en este caso, la coagulación no está mayormente influenciada por las fuerzas electrostáticas, sino por el fenómeno coloide en uno o más puntos fijos de adsorción, dejando el resto de la cadena libre, de forma que pueda flotar en el líquido y adherirse a su vez a otro coloide. Se forma así un puente molecular que une una partícula con otra. La repetición de este fenómeno entre diversas partículas es lo que permite la aglutinación de ellas en masas denominadas “flocs”.

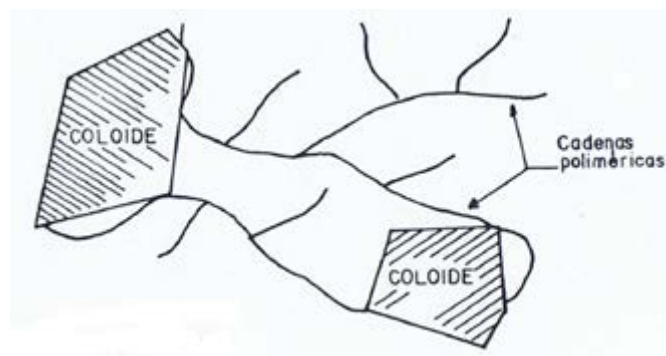


Figura 4.5 Adsorción de polímeros en una partícula de caolinita.

Tabla 4.6 Clases de Coagulación

Clase	Modo	Tipo de Adsorción
1. Adsorción – desestabilización	Neutralización de la carga. Compresión del doble lecho.	Adsorción electrostática. Adsorción química.
2. Puente químico	Unión de partículas por medio de cadenas poliméricas.	Adsorción química.
3. Barrido	Producción de precipitado químico.	No hay

4.2.6.4 Coagulación por barrido

La coagulación por barrido (o por incorporación) se produce cuando se agrega una concentración de coagulantes tan alta, que se excede el límite de solubilidad de ese compuesto en el agua. En ese momento se precipitan los hidróxidos que se forman por reacción de la alcalinidad y el agua con los coagulantes, con lo que se induce la producción de una masa esponjosa (floc de barrido) que atrapa en su caída a los coloides y partículas suspendidas las cuales se ven forzadas a decantar incorporadas dentro del precipitado que desciende.

Este tipo de remoción de turbidez, no es una verdadera coagulación, pero es la que más frecuentemente se produce, debido a que en la práctica, las dosis que se usan están por encima del límite de solubilidad de los hidróxidos de aluminio o hierro en el agua, a los pH y temperaturas normales de trabajo.

La coagulación por barrido no excluye, sin embargo, la posibilidad de que simultáneamente se produzca también en parte o en una etapa inicial, coagulación por puente químico, e incluso coagulación por adsorción-neutralización. El proceso de coagulación, pues, se realiza por medio de diferentes mecanismos que se superponen y complementan.

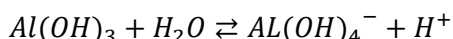
Para poder conocer qué tipo de coagulación se produce, suelen utilizarse los llamados diagramas de coagulación (Arboleda, 2000).

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

4.2.7 Diagramas de coagulación

Los diagramas de coagulación (figura 4.6) son herramientas útiles para predecir las condiciones químicas que gobiernan el proceso. Dichos diagramas se usan para definir las dosis de coagulantes en función de los pH y se desarrollan a partir de los diagramas de estabilidad termodinámica para la fase sólida del hidróxido de aluminio, para los ejemplos que se mostrarán a continuación.

Partiendo de que el ion aluminato ($Al(OH)_4^-$) es una especie soluble en equilibrio con el hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3$) en los rangos alcalinos, y cuya ecuación es la siguiente:



Si obtenemos la constante de equilibrio de la anterior ecuación, tenemos:

$$K_1 = \frac{[H^+][Al(OH)_4^-]}{Al(OH)_3}$$

Como $Al(OH)_3 = 1$, si se obtienen los logaritmos negativos:

$$-\log[K_1] = -\log[H^+] - \log[Al(OH)_4^-] = 12.35$$

Arreglando los términos, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\log[Al(OH)_4^-] = pH - 12.35$$

Esta es la ecuación de una línea recta con pendiente +1, y es la que forma el marco básico del diagrama de coagulación. Líneas similares se pueden derivar para otras especies hidrolíticas de aluminio, las cuales forman los límites de la región dentro de la cual existe el hidróxido de aluminio en su fase sólida.

Los resultados sobre coagulación fueron introducidos, dentro del diagrama $\log Al^{+++}$ en moles por litro vs pH de la solución mezclada y superpuestos a los diagramas de estabilidad (Figura 4.6). Como se muestra en la figura, las líneas de estabilidad para $Al(OH)_4^-$, $Al(OH)^{++}$ y $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ que forman el marco de los diagramas de coagulación y de las regiones donde las especies hidrolíticas solubles o el hidróxido de aluminio en fase sólida (que tiene carga eléctrica) interacciona con las especies coloidales para producir coagulación (Arboleda, 2000).

La interacción entre los coloides y el hidróxido de aluminio mostrado en dicha figura indica también el potencial zeta resultante debido a dichas interacciones.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

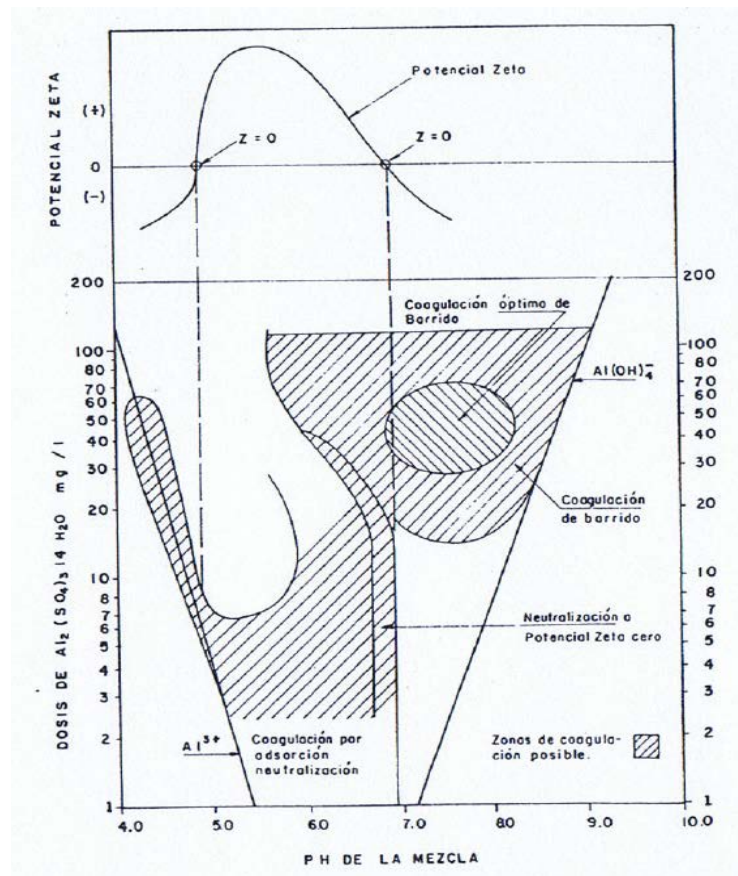


Figura 4.6 Zonas de coagulación de turbidez para distintas dosis de sulfato de aluminio a distinto pH.

4.3 Coagulantes

Como ya se mencionó anteriormente, los agentes químicos encargados de romper la estabilidad de los contaminantes en el agua se denominan coagulantes (Hernández, 1990). Generalmente se utilizan coagulantes inorgánicos y/o polímeros durante el proceso de tratamiento de aguas para eliminar sólidos suspendidos, bacterias y virus. En la actualidad, se utilizan principalmente dos sustancias químicas como coagulantes en países desarrollados: sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), y sulfato férrico ($Fe_2(SO_4)_3$); y es debido a la disponibilidad limitada y al gasto relativo de estos químicos para los países en desarrollo, existe la necesidad de encontrar alternativas para la purificación del agua, sobre todo para localidades rurales (Pritchard et al, 2010).

Los coagulantes pueden ser clasificados en dos grupos: los polielectrolitos o coadyuvantes de coagulación y los coagulantes metálicos, ambos grupos básicamente actúan como polímeros además de la carga eléctrica que poseen.

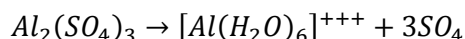
“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

En el caso de los polímeros, las cadenas ya están formadas cuando se les agrega al agua. En el caso de los coagulantes metálicos, la polimerización inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de lo cual viene la etapa de adsorción por los coloides presentes en la fase acuosa. Es necesario observar que la velocidad de sedimentación de las partículas coaguladas no depende en forma exclusiva de los coagulantes usados sino del peso de las partículas que se trata de sedimentar.

4.3.1 Coagulantes más utilizados

Entre los coagulantes más usados a nivel mundial podemos encontrar las sales de aluminio y las sales de hierro. Las sales de aluminio forman un floc ligeramente pesado; las más conocidas de éstas son el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el cloruro de polialuminio. Entre las anteriores, el sulfato de aluminio es el coagulante más utilizado para el proceso de coagulación/floculación en el tratamiento primario de aguas residuales, debido a su bajo costo y su manejo relativamente sencillo.

Entre las sales de aluminio, la más utilizada como coagulante es el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, el cual es un polvo de color marfil, ordinariamente hidratado, que con el almacenaje suele convertirse en terrones relativamente duros. Cuando está en solución se encuentra hidrolizado, es decir, asociado con el agua:



Esta es una propiedad común con todos los cationes metálicos, que no pueden permanecer aislados cuando están rodeados de moléculas de agua. Debido a que las bases que constituyen la alcalinidad son más frecuentes que el agua, el $[Al(H_2O)_6]^{+++}$ reaccionará siempre con ellas, produciendo un consumo y descenso del pH. El producto final es un hidróxido de aluminio insoluble que precipita a ciertos pH y que puede no tener carga, o carga negativa. Las especies que contienen un sólo ion de aluminio se polimerizan y reaccionan entre sí. Tanto los iones de aluminio hidratados como los compuestos poliméricos pueden ser adsorbidos rápidamente por las partículas del agua, produciendo su desestabilización. Los hidróxidos de aluminio son, en cambio, menos efectivos como coagulantes (Arboleda, 2000).

4.3.2 Coagulantes naturales

El uso de los coagulantes químicos (como el sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sulfato férrico, etc.) conlleva una seria problemática: los costos y la falta de disponibilidad en el área, especialmente en países en desarrollo; la presencia de metales en los residuos de las aguas tratadas, y el gran volumen de lodos que pueden ser generados. Estos lodos son a menudo de baja calidad ya que contienen metales que afectan la biodegradabilidad y resultan en características pobres después de su deshidratación (Ghebremichael et al, 2009).

Es por lo anteriormente descrito que en la actualidad existe un gran interés en la comunidad científica por el desarrollo de nuevos coagulantes alternativos que no tengan estos impactos (Murillo, 2009). Es entonces necesario evaluar el rendimiento de otros coagulantes en la clarificación de las aguas residuales; estos coagulantes alternativos son obtenidos a menudo de desechos de alimentos, por lo tanto, no son tóxicos y son de bajo costo; entre ellos se encuentran los taninos, semillas de *Moringa oleifera*, granos de mezquite y *Cactus latifaria* (Ozacar y Sengil, 2003), y muchas otras variedades de extractos de plantas. Muchos de estos son específicos de cada región de origen. Un coagulante disponible de manera natural es la quitina o su derivado quitosano, el cual típicamente se deriva de artrópodos, del caparazón de crustáceos, así como también de algunas hongos y levaduras (Fabris, 2010).

4.3.2.1 *Moringa Oleifera*

Como se mencionó anteriormente, entre las alternativas de estudio se encuentran las semillas de *Moringa oleifera*. La *Moringa* es conocida como una planta medicinal y una fuente de aceite vegetal; debido a esto y al hecho de que la mayoría de sus partes son útiles para una gran variedad de aplicaciones, es considerada de gran valor (Rodríguez et al, 2007). Las semillas de *Moringa* son ampliamente utilizadas como un método alternativo de tratamiento de aguas en países en desarrollo; se ha reportado el uso efectivo de este material en el tratamiento de aguas residuales, observándose una mayor eficiencia en aguas con mayor turbidez. Una suspensión de semillas trituradas reduce la turbidez y mejora la calidad del agua (Ghebremichael et al, 2009).

Entre los materiales naturales, la *Moringa oleifera* (Figura 4.7) ha sido reconocida como uno de los mejores extractos de plantas para la purificación del agua; se ha encontrado

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

que el componente activo de la *M. oleifera* que permite la coagulación es una proteína soluble que actúa como un polielectrolito catiónico natural durante el tratamiento del agua y permite la coagulación (Pritchard et al, 2009).

El árbol de *Moringa* generalmente alcanza los 10 m de alto, éste puede ser cultivado fácilmente y está distribuido muy ampliamente en partes de África e India, con especies naturalizadas que pueden ser encontradas América tropical, Sri Lanka, México, Malasia y las Islas Filipinas (Duke, 1983). A nivel mundial han sido identificadas 14 especies diferentes, y todas producen sus semillas en vainas, que varían en longitud de 150 a 1200 mm, dependiendo de la especie; el peso de las semillas varía de la misma manera de 150 a 300 mg (Jahn, 1989).

El árbol de *M. oleifera* puede producir alrededor de 2000 semillas por año. Este número de semillas podría ser utilizado para tratar cerca de 6000 L de agua, si se utiliza una dosis de 50 mg/L (Pritchard et al, 2009). Sin embargo, se puede cultivar a los árboles para que produzcan de 5 a 10 veces la cantidad de semillas mencionadas (por ejemplo, de 10000 a 20000). Esto produciría hasta 60000 L de agua tratada por año. Desde 1970, la *M. oleifera* ha captado la atención de varios investigadores, valorando su potencial como coagulante. Sin embargo, hay muy poca información para poder realizar una comparación entre la efectividad de este coagulante y la de un coagulante químico como el alumbre.

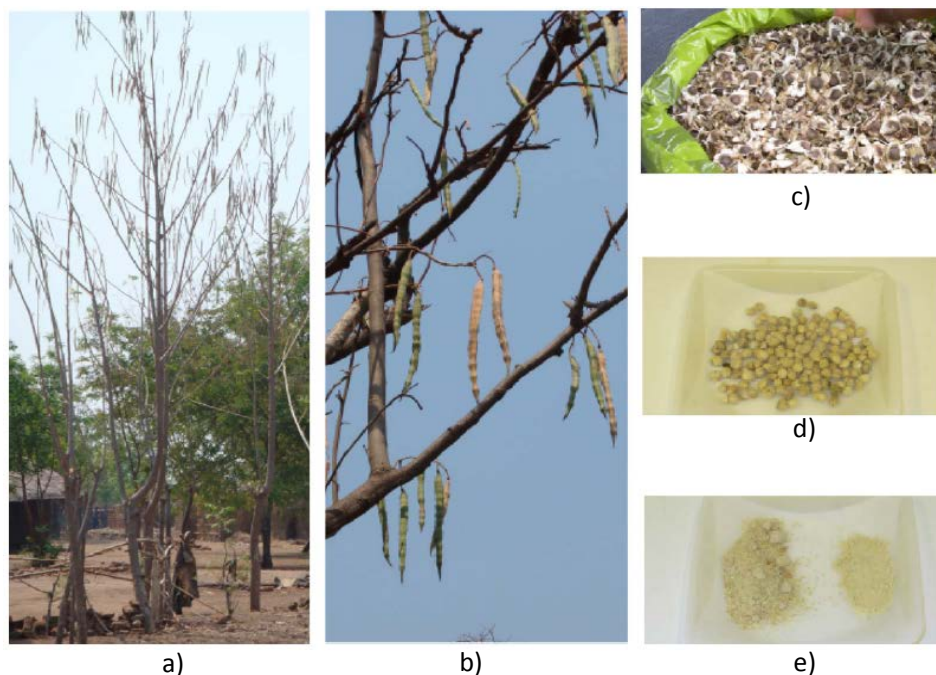


Figura 4.7 *Moringa oleifera*: a) Árbol, b) Vainas que contienen las semillas, c) Semillas, d) Semillas peladas, y e) Polvo obtenido de la trititación de las semillas.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Se ha reportado que una proteína extraída de las semillas de *Moringa* puede eliminar ácidos húmicos del agua, reducir la materia orgánica, eliminar los olores y la coloración del agua; se ha sugerido que su mecanismo involucra la adsorción y la neutralización de cargas (Santos et al, 2011). De igual forma, diversos estudios han mostrado que el uso de coagulantes naturales provenientes de la semilla *Moringa* es comparable al sulfato de aluminio, siendo por lo tanto recomendada su aplicación como un coagulante eficaz en el tratamiento de aguas residuales (Lédo et al, 2009).

4.3.2.2 Quitina y Quitosano

La aplicación de agentes coagulantes y floculantes naturales para la potabilización del agua ha sido estudiada principalmente debido a sus ventajas como la biodegradabilidad, baja producción de lodos y menores riesgos a la salud. La quitina, y su derivado, el quitosano es otro coagulante alternativo que también ha sido estudiado. El quitosano es un polímero natural obtenido de la quitina, a través de la desacetilación en medios alcalinos. Es un biopolímero no tóxico y tiene una gran variedad de aplicaciones en los campos de biotecnología, biomédico, ambiental, microbiología y farmacéutico. El quitosano ha sido utilizado en la preparación de algunos materiales biotecnológicos como los materiales que estimulan las células, agentes antibacteriales, anticoagulantes de la sangre, fotografía, cosméticos, piel artificial, nutrición y oftamología, entre otros (Elwakeel, 2010). En cuanto a su uso como coagulante y también como floculante, se ha encontrado que es eficiente a concentraciones mucho menores en comparación con las sales metálicas convencionales, además de no dejar metales residuales después del proceso de coagulación (Zonoozi, 2011).

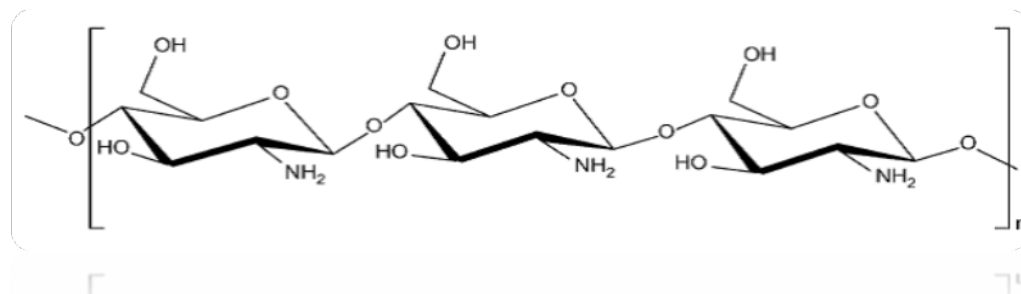


Figura 4.8 Estructura del quitosano.

Estudios realizados para evaluar el uso de los coagulantes para el tratamiento de efluentes diarios donde se mezclaron diferentes tipos de coagulantes como los inorgánicos (cloruro

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

de aluminio y férrico), compuestos poliméricos (cloruro de polialuminio) y compuestos orgánicos naturales (carboximetil celulosa de sodio, ácido algínico, y quitosano). Entre todos ellos, se encontró que el quitosano fue el mejor coagulante, incluso cuando se aplicó a bajas dosis (Bergamasco et al, 2009).

El quitosano, que puede ser sintetizado por desacetilación de la quitina (uno de los biopolímeros más accesibles), ha sido investigado como coagulante y floculante para la remoción de impurezas del agua natural y del agua residual. El quitosano se describe como un polielectrolito catiónico y se espera que coagule las partículas suspendidas con cargas negativas que se encuentran en las aguas con mucha turbidez. En estudios reportados se ha evaluado la efectividad del quitosano como un coagulante floculante en la remoción de turbidez del agua, se aplicaron diferentes concentraciones de partículas suspendidas y de floculantes, así como un amplio rango de valores de pH. De acuerdo a este estudio, los mejores resultados se encontraron en un rango de pH de 7 a 7.5, la concentración de quitosano de 0.5 mg/L efectivamente redujo el valor de la turbidez por debajo de 5 NTU sin importar el valor inicial de turbidez (Bergamasco et al, 2009).

También se han realizado estudios sobre los efectos del quitosano y policloruro de aluminio en la coagulación de aguas preparadas sintéticamente con valores conocidos de turbidez, y se observó que la dosis óptima del quitosano fue más pequeña que la de policloruro de aluminio, de igual modo, el tamaño del floc fue más grande y con tiempos de sedimentación más cortos.

4.4 Determinación de la dosis óptima mediante prueba de jarras.

El objetivo es poder determinar la dosis de coagulantes que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales en la planta y hacer que se forme un floc pesado y compacto que quede fácilmente retenido en los sedimentadores y no se rompa al pasar por el filtro. No necesariamente el floc que sedimenta rápidamente es el que queda retenido en el filtro con más facilidad. El floc que se busca, por lo tanto, es aquel que da el mayor rendimiento en el conjunto de los procesos de clarificación.

El equipo de prueba de jarras fue desarrollado entre los años de 1918 y 1921 por Langelier y Baylis, separadamente. Consta de un agitador múltiple de velocidad variable que puede crear turbulencia simultáneamente en 6 vasos de precipitado (Figura 4.9).

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”



Figura 4.9 Prueba de Jarras.

En este equipo se tratan de reproducir las condiciones en las cuales se produce la floculación en la planta.

Turbidez. La medición de la turbidez del agua después de floculada y sedimentada durante un cierto tiempo (turbidez residual) suele considerarse como el parámetro más importante para caracterizar el proceso. Puede hacerse con un turbidímetro de transmisión o con uno de diseminación. Cuando se trata de evaluar pequeños valores de turbidez es preferible el uso de turbidímetros de diseminación, por ser más precisos.

Comparación de color. Con frecuencia existe un mayor interés por eliminar el color del agua que su turbidez. Es en estos casos donde la medición del color residual del agua después de floculada y sedimentada puede servir para caracterizar el ensayo de prueba de jarras. El color puede medirse mediante comparación con el método del platino-cobalto, o con equipos especiales., y se expresa en unidades de color.

pH. La medición del pH antes y después de la floculación tiene una importancia básica. Por tanto, debe disponerse siempre de un sistema de medición de pH, siendo este por colorimetría o con electrodos.

Termómetro. La prueba de jarras debe realizarse, en medida de lo posible, a la misma temperatura que la que tiene el agua en la planta de tratamiento. Dejar los vasos sobre un iluminador o sobre un objeto caliente afecta los resultados, haciéndolos variables e inconsistentes.

5. METODOLOGÍA

5.1 Muestreo y caracterización del agua

Las aguas y lodos que fueron utilizadas para este estudio provienen de un efluente de aguas residuales municipales ubicado en el municipio de Tlachaloya, Edo. de México. La metodología de trabajo se describe a continuación:

1. Se realizó un muestreo en campo en el mes de noviembre (posterior a lluvias); el agua residual y los lodos fueron caracterizados en el municipio de Tlachaloya, que sirvieron para el estudio de los materiales naturales que se emplearon para los procesos de coagulación-floculación, para ello se determinaron parámetros en campo: pH, temperatura, dureza y alcalinidad.

Tabla 5.1 Parámetros e instrumentos que se utilizaron para la medición en campo.

Parámetros	Instrumento
pH	Interfaz QuestLab Vernier, EE.UU
Temperatura	Interfaz QuestLab Vernier, EE.UU
Dureza y Alcalinidad	Espectrómetro portátil HACH DR., Standard methods of Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998)

2. En el laboratorio se complementó la caracterización del agua residual y los lodos en suspensión determinando materia orgánica a través de COT (figura 5.1), DQO, DBO y Turbidez. Así mismo cationes totales como Ca, Cu, Fe, Ka, Mn y Na, En las tablas 5.1 y 5.2 se muestran los parámetros, instrumentos y métodos que fueron utilizados.
3. Determinación de la concentración de Ca, Cu, Fe, Ka, Mn y Na presentes en las semillas de *Moringa*, mediante absorción atómica (figura 5.2).

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 5.2 Parámetros, instrumentos y métodos que se emplearon para los análisis en laboratorio.

Parámetros analizados en laboratorio	Instrumento y métodos
Carbono orgánico total	Analizador de carbono MultiNC 3000 (AnalytikJena, Alemania).
DQO total y disuelta	Espectrómetro portátil HACH DR. Muestras previamente digeridas en un reactor 2400COD marca HANNA Instruments HI839800.
DBO₅	Sistema de sensor FOC225E en incubadora 10 (VELP, Italia).
Turbidez	Colorímetro HACH 895, Standard methods of Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998).
Cationes y Aniones, Metales	Espectrofotómetro de absorción atómica modelo SOLAAR M6 Thermo Elemental, por los métodos de llama y horno de grafito.



Figura 5.1 Analizador de carbono MultiNC 3000 AnalytikJena.



Figura 5.2 Espectrofotómetro de absorción atómica modelo SOLAAR M6 Thermo Elemental

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

4. Extracción y preparación de los coagulantes a partir de semillas de *Moringa* empleando la metodología descrita en el punto 5.3.
5. Síntesis de quitina y quitosano a partir de la cáscara de camarón, utilizando la técnica descrita en el punto 5.4. su caracterización a través de Espectrofotometría de Rayos X, Infrarrojo, y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Tabla 5.3 Instrumentos que fueron utilizados para la caracterización de la materia prima y en las pruebas de coagulantes.

Análisis	Instrumento
Espectrofotometría con Rayos X	Espectrofotómetro Infrarrojo modelo D5000 SIEMENS (ININ).
Espectrofotometría Infrarroja	Thermo Fisher Scientific, NICOLETE iS10.
Microscopía Electrónica de Barrido	Microscopio JSM-6610 LV JEOL, (ININ).
Prueba de Jarras	JLT6 VELP Scientifica
Potencial Zeta	ZetaPlus Brookhaven Instruments Corporation.

6. Mediante el uso de prueba de jarras se estudiaron los procesos de coagulación-floculación, con el objetivo de obtener la dosis óptima y pH.
7. Determinación de los parámetros de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación y pH. Se propusieron para los ensayos preliminares las condiciones mostradas en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Parámetros preliminares para evaluar los coloides propuestos en este proyecto.

PRUEBAS DE JARRAS	Sulfato Aluminio	<i>Moringa</i>	Quitosano
Velocidad de coagulación (rpm)	100	150	100
Tiempo de coagulación (min)	1	2	1
Velocidad de floculación (rpm)	25	25	25
Tiempo de floculación (min)	15	15	15
Tiempo de sedimentación (min)	20	20	20

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

8. Construcción de las gráficas de turbidez en función de la dosis de coagulante utilizada, eficiencia de remoción en función de la dosis de coagulante, turbidez en función del pH del agua residual y eficiencia de remoción vs pH del agua, para cada coagulante.
9. Se realizaron pruebas con mezclas de coagulantes donde se repitieron los análisis y estudios citados en los puntos 6, 7 y 8. Se proponen las siguientes combinaciones:

Tabla 5.5 Combinaciones propuestas para las pruebas con mezclas de coagulantes.

% Quitosano	% <i>Moringa</i>
50	50
75	25
25	75

10. Se determinó qué coagulante, tanto usado individualmente como en las combinaciones, permitió alcanzar la mayor eficiencia de remoción.

5.2 Metodología para la preparación de coagulante de Sulfato de Aluminio

1. Para la preparación del coagulante se utilizó Sulfato de Aluminio de grado analítico.
2. Se pesó 1 gramo del reactivo y se disolvió en agua desionizada.
3. La solución resultante se aforó en un matraz volumétrico de 100 ml.
4. La concentración final del coagulantes es de 10 mg/ml, lo cual facilitará la dosificación del mismo durante las pruebas de jarras.

5.3 Metodología para la preparación de coagulante de semillas de *Moringa oleifera*

1. Las semillas de *Moringa oleifera* fueron peladas a mano y reducidas a un polvo fino con ayuda de un molino Micro-Mill.Bel-Art de Scienceware (Figura 5.3).



Figura 5.3 Molino Micro-Mill.

2. El polvo fue tamizado con un malla Tyler de tamaño de poro de 0.4 mm.
3. Para la extracción del componente activo, se realizaron dos tipos de tratamiento: el primero con NaCl 0.5 M y otro simple con agua desionizada. Para el caso del tratamiento con NaCl se pesó el polvo y se mezcló con 100 ml de NaCl 0.5 M, manteniendo en agitación durante 15 minutos. Para el caso de la extracción simple, el polvo tamizado se mezcló con 100 ml de agua desionizada y se mantuvo en agitación durante 15 minutos.
4. La solución se filtró y posteriormente fue utilizada como coagulante. La concentración del coagulante preparado fue de 10 mg/ml.

5.4 Metodología para la síntesis de quitosano a partir de cáscara de camarón

1. La cáscara de camarón recolectada en los restaurantes se lavó con extrán neutro, se eliminaron todos los residuos orgánicos, y se secó mediante liofilización, ya que no es conveniente usar calor debido a que se puede degradar el caparazón, afectando las propiedades fisicoquímicas de la quitina y quitosano sintetizados. Posteriormente, se molió la cáscara de camarón con el molino Micro-Mill, y se tamizó con una malla Tyler con tamaño de poro de 0.4 mm.
2. Para la desproteínización, las muestras se trataron con una solución de hidróxido de sodio NaOH 1M durante 48 hrs.
3. La mezcla se filtró y se lavó a neutralidad con agua destilada.
4. Posteriormente el material se sometió a un tratamiento de desmineralización con una solución de HCl con pH 3, se introdujo a un baño maría a 60°C durante 30 minutos,

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

después se filtró la mezcla y material se secó a temperatura ambiente durante 24 horas, en este punto el material ya es considerado quitina cruda.

5. A la quitina cruda se le agregó acetona durante 24 hrs. y se mantuvo con agitación magnética constante, con el objetivo de blanquearla. Se filtró la solución y el material se secó a temperatura ambiente de 24 a 48 hrs.
6. La quitina blanqueada obtenida se somete a un tratamiento de desacetilación con una solución de NaOH 1M durante 2 hrs a 100°C y con agitación magnética constante.

Lavado a neutralidad

- Se adiciona agua destilada a los recipientes que contienen la cáscara de camarón.
- Se agita la muestra a 200 rpm durante 30 min.
- Se dejan sedimentar los sólidos y por decantación se elimina el agua.
- Se repite la operación hasta que el pH del agua eliminada sea igual al del agua destilada.

En la parte preliminar del trabajo se utilizó quitosano de diferentes viscosidades (alta y media), obtenido a partir del caparazón de cangrejos. Todos son grado analítico y presentan más del 75% de desacetilación; fueron adquiridos a la empresa BioChemika.

5.5 Metodología para la determinación de acidez superficial

Se realizó un análisis de la acidez superficial de los tres coagulantes de manera individual, con el objetivo de obtener el intervalo donde se encontró el pH óptimo de operación para cada coagulante. Esto se realizó mediante la titulación de los coagulantes preparados de dos formas: la primera del mismo modo en que fueron utilizados para las pruebas de jarras, y la segunda con KNO_3 0.3 M como electrolito soporte, sustituyendo al agua desionizada en el proceso de preparación del coagulante, con el objetivo de minimizar la fuerza iónica. Los coagulantes se titularon con KOH 0.3 M, y se graficaron los cambios de pH respecto al volumen utilizado, así como los valores de la derivada del pH respecto al volumen de solución utilizada, para obtener las curvas de Gran.

5.6 Prueba de jarras

Se utilizó como coloide comparativo en los ensayos el sulfato de aluminio, con cada uno de los coagulantes, variando la dosificación de cada coagulante y controlando en cada caso el pH. Se utilizó un equipo de prueba de jarras JLT-6 de Velp Scientifica (figura 5.4).

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”



Figura 5.4 Prueba de jarras JLT-6 Velp Científica.

- ✚ Para cada uno de los coagulantes, incluyendo al sulfato de aluminio se realizaron 5 pruebas de jarras, variando las dosis de cada uno. Las dosis iniciales que fueron propuestas para las pruebas iniciales se mencionan en el siguiente capítulo, todas ellas fueron seleccionadas con base en la revisión bibliográfica (Lédo *et al*, 2009; Vázquez, 1994; Fabris, 2010).
- ✚ De acuerdo a los resultados encontrados, se realizaron más pruebas para encontrar la dosis óptima de cada coagulante, cada una de ellas se realizó por triplicado para asegurar la repetitividad de los resultados.

5.6.1 Metodología de la prueba de jarras para la determinación de la dosis óptima

1. Se determinó la turbidez inicial del agua residual.
2. Se añadieron los coagulantes al agua en dosis progresivas en cada vaso de precipitado de la siguiente forma: con ayuda de jeringas se prepararon las cantidades de coagulante que se colocarían en cada vaso, y se inyectó el contenido de cada jeringa en la jarra correspondiente, cuidando que la solución penetre profundamente para que la dispersión sea más rápida, inmediatamente se comienza con la mezcla rápida con los parámetros señalados en la tabla 5.4. De esta forma se evitan las imprecisiones en la cantidad dosificada.
3. Una vez hecha la mezcla rápida se disminuye la velocidad de rotación de las paletas a las condiciones de mezclado lento de la tabla 5.4, y posteriormente se suspende la agitación, se extraen las paletas y se deja sedimentar el agua.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Una vez mezclados los coagulantes con el agua se pueden hacer las determinaciones de tipo cualitativo, tales como evaluación del tamaño del floc producido o tiempo inicial de formación del floc; y determinaciones cuantitativas como determinaciones físicas y químicas, como color, alcalinidad y pH.

5.6.2 Metodología para la determinación de la influencia del pH en la coagulación

El pH tiene una gran influencia en la coagulación, existiendo un pH óptimo, y valores por encima o por debajo de éste producen malos resultados. El objetivo del ensayo es determinar el rango de pH óptimo que caracteriza a la muestra estudiada, puede variar según el agua y los reactivos empleados.

Una vez obtenidos los valores preliminares de pH con el estudio de la acidez superficial, se procedió a comprobar estos mediante pruebas de jarras, de la siguiente manera:

1. Una vez conocidas las dosis óptimas de cada coagulante, se colocó la misma cantidad de agua de la muestra en las 6 jarras y a cada una de ellas se le agregó ácido sulfúrico diluido 0.1 N o hidróxido de sodio diluido a 0.1 N, para bajar o subir el pH, de forma que éste varíe desde más o menos 4-5 en la primera, hasta 8-9 en la última.
2. Una vez conocidas las cantidades de ácido o álcali necesarias para obtener el pH deseado, se ajustó en cada jarra, se esperó unos minutos hasta que se estabilizó el pH y se aplicó la dosis óptima de coagulante.
3. Se disminuyó luego la velocidad de rotación a las condiciones de mezcla lenta.
4. Se retiraron las paletas de los vasos y se dejó sedimentar el agua.
5. Se extrajo el sobrenadante y se le determinó el pH y la turbidez.

5.7 Determinación del potencial Zeta y tamaño de partícula de cada coagulante

La medida del potencial ζ de cada coagulante indicó su carga superficial. El procedimiento es el siguiente:

- Se determinó primero el tamaño de partícula promedio de los coagulantes obtenidos y posteriormente, el potencial zeta. Para ello, se emplea el equipo ZetaPlus marca Brookhaven Instruments Corporation.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”



Figura 5.5 Equipo de potencial Zeta, ZetaPlus, Brookhaven Instruments.

- Este proceso se realizó con los coagulantes naturales y con el sulfato de aluminio.

5.8 Determinación de los grupos funcionales que integran la estructura molecular del Quitosano por Espectroscopía IR

Para esta fase experimental se utilizó un equipo de espectrometría de infrarrojo Thermo Scientific Nicolet iS10. Se determinó el espectro IR para cada variedad de quitosano (viscosidad alta, media y baja) como se describe a continuación:



Figura 5.6 Equipo de espectrometría de infrarrojo Thermo Scientific Nicolet iS10.

1. Antes de utilizar el equipo IR se hizo un diagnóstico para revisar que la señal y energía sean adecuados para su correcto funcionamiento, verificando de esta manera el interferograma, corroborando que la interferencia debe de ser constructiva y no destructiva.
2. Se ejecutó un test de limpieza del equipo, para confirmar que se encuentre en un adecuado estado y evitar interferencias en los espectros a determinar.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

3. La longitud de onda se ajusta de 350 a 4000 cm^{-1} , el número de escaneos es de 24, las unidades en la que se obtienen los espectros es en absorbancia, posteriormente se cambian a transmitancia.
4. Se colocó la muestra, y se comprime con un brazo móvil del equipo, se determina el espectro.
5. Las manipulaciones que se hacen a cada espectro son con el software OPUS 6.5, con el cual se ajusta a la línea base cada espectro y se determinan las longitudes de onda en la que aparecen los picos en los que absorbe energía la molécula, se guarda la información.
6. Posteriormente se convierte de unidades de absorbancia a unidades de transmitancia, de nuevo se ajusta a la línea base y se determina las mismas longitudes de onda que el otro espectro, se guarda la información, y el proceso descrito se aplica para cada muestra.

5.9 Análisis de la superficie por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Para este análisis se utilizó un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, JEOL JSM-5900 LV. Scanning electrón microscope (SEM).



Figura 5.7 Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca: JEOL, modelo: JSM-5900 LV.

Para cada muestra se trabajó bajo las siguientes condiciones de operación (ININ):

1. Voltaje: 20
2. WD: 10

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

3. Señal: BEI
4. Horas: 2
5. Presión: 20
6. Magnificación: 500-2000
7. Spot Size: 60
8. Número de imágenes: 25

5.10 Difracción de Fluorescencia de Rayos X

Para este estudio se utilizó un Difractómetro de Rayos X, marca: Siemens, modelo: D5000X- Ray Diffractometer.



Figura 5.8 Difractómetro de Rayos X, D5000 X- Ray Diffractometer, Siemens.

Las condiciones bajo las cuales se trabajaron las muestras de quitosano son las siguientes.

1. Angulo: 2θ 2.5 a 80
 2. Step Size: 0.05
 3. Step time: 0.8
 4. Step Mode: continuo
 5. Range Time: 20 min.
 6. Sample 2θ : 1.25 a 40
 7. Kv: 35
 8. mA: 25
- 3.1.2.4

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

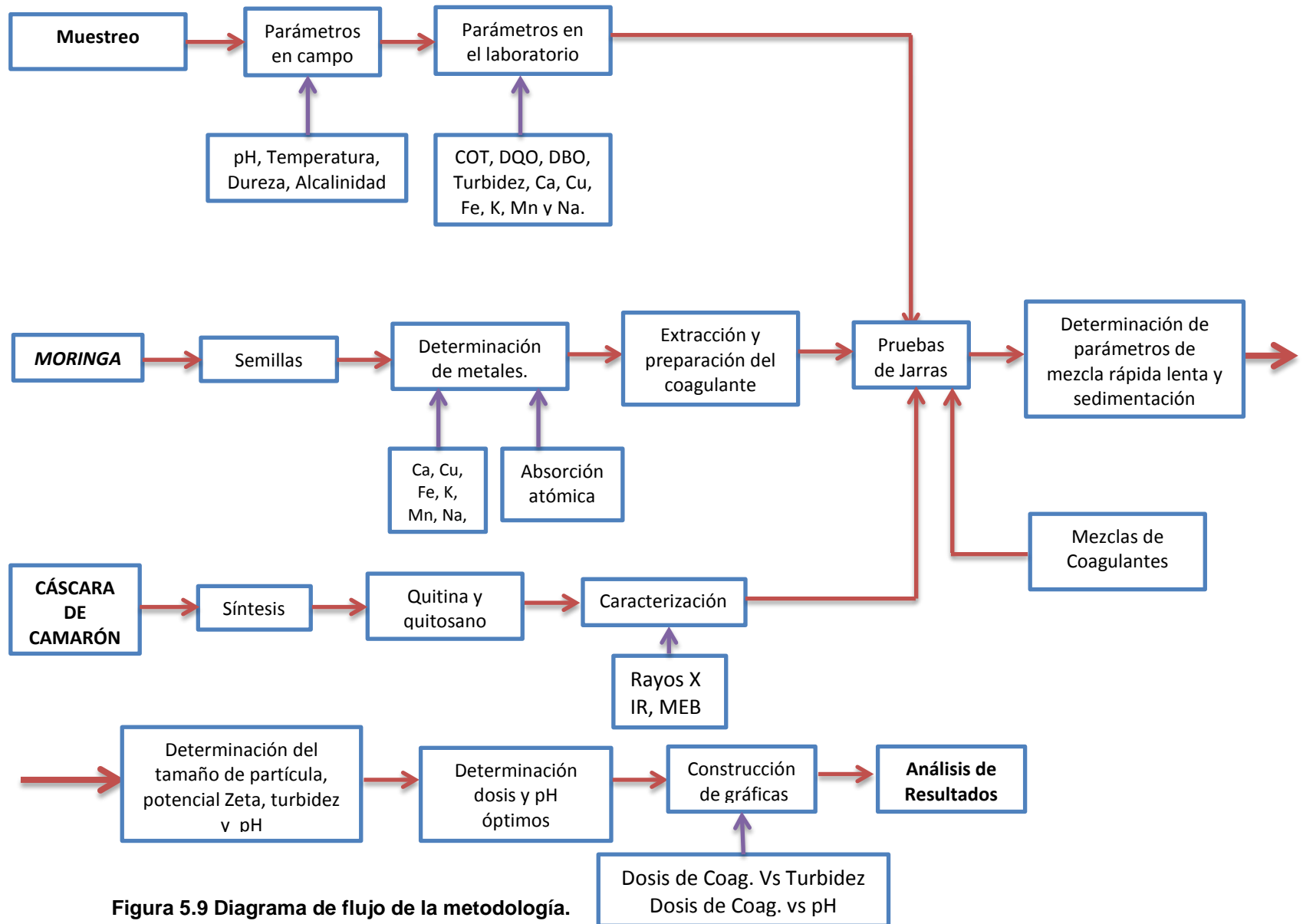


Figura 5.9 Diagrama de flujo de la metodología.

6. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el proyecto, donde se utilizó, como se indicó en el capítulo de materiales y métodos, sulfato de aluminio como testigo, por lo que primero se presentarán en esta sección los resultados de este coagulante y posteriormente de los coagulantes naturales moringa y quitosano, para cada análisis.

Se utilizó en el proyecto el sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ como testigo, por ser el coagulante más utilizado en la etapa de coagulación-floculación del tratamiento de aguas para potabilización y de las aguas residuales en los tratamiento para el material particulado cuyo tamaño es considerado coloidal y es difícil su sedimentación. A continuación se presentan los resultados de las primeras pruebas realizadas con este coagulante.

6.1 Caracterización del Agua Residual

Se analizó el contenido de carbono, alcalinidad, DBO y DQO y pH en el agua residual. Los resultados se pueden observar en tabla 6.1.

Tabla 6.1 Caracterización del agua residual.

Alcalinidad (mg/L $CaCO_3$)	230.750
Carbono Total (mg/L)	245.867
Carbono Orgánico (mg/L)	77.154
Carbono Inorgánico (mg/L)	168.713
DBO (mg/L)	113.400
DQO (mg/L)	424.417
pH	8.136
Turbidez (NTU)	450 – 650
Ca (mg/L)	0.2800
Fe (mg/L)	*
K (mg/L)	0.5655
Mn (mg/L)	0.1840
Na (mg/L)	0.3427

* Debajo del límite de detección del equipo, para Fe 0.05 mg/L.

6.2 Determinación de la acidez superficial

La determinación de la acidez superficial fue necesaria con el objeto de proporcionar de manera preliminar **el intervalo del pH óptimo de operación de cada uno de los coagulantes preparados**, para ello fue necesario realizar mediante titulaciones de los coagulantes: sulfato de aluminio con KOH (0.3 M), quitosano y moringa, y la construcción de la correspondientes gráficas.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

6.2.1 Sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$

A continuación se presentan las gráficas de titulación del sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ y su correspondiente curva de Gran. Fue necesario utilizar para este trabajo las curvas de Gran para poder definir con precisión el punto final de la titulación, donde se utilizó para ello la primera derivada del pH vs Volumen, como se puede observar en la figura 6.1. El valor óptimo para este caso es de un pH de 8.5 con un volumen de la base KOH de 11 ml y la primera derivada de -3.75. En este primer caso no se utilizó electrolito soporte.

Tabla 6.2 Datos de la titulación del Sulfato de Aluminio con KOH.

V KOH (ml)	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	3.434	-0.194	0.50	-0.388
0.50	3.628	-0.083	0.50	-0.166
1.00	3.711	-0.048	0.50	-0.096
1.50	3.759	-0.037	0.50	-0.074
2.00	3.796	-0.035	0.50	-0.070
2.50	3.831	-0.029	0.50	-0.058
3.00	3.860	-0.011	0.25	-0.044
7.00	4.136	-0.067	0.50	-0.134
8.00	4.289	-0.129	0.50	-0.258
9.00	4.829	-1.823	1.00	-1.823
10.00	6.652	-0.918	0.50	-1.836
11.00	8.535	-0.375	0.10	-3.750
11.10	8.910	-0.123	0.10	-1.230
11.20	9.033	-0.283	0.15	-1.887
11.35	9.316	-0.154	0.15	-1.027
11.50	9.470	-0.095	0.10	-0.950
11.60	9.565	-0.085	0.10	-0.850
11.70	9.650	-0.080	0.10	-0.800
11.80	9.730	-0.130	0.20	-0.650
12.00	9.860	-0.025	1.00	-0.025
13.00	9.885	0.005	0.50	0.010
13.50	9.880	-0.020	0.50	-0.040
14.00	9.900	-0.030	0.50	-0.060

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

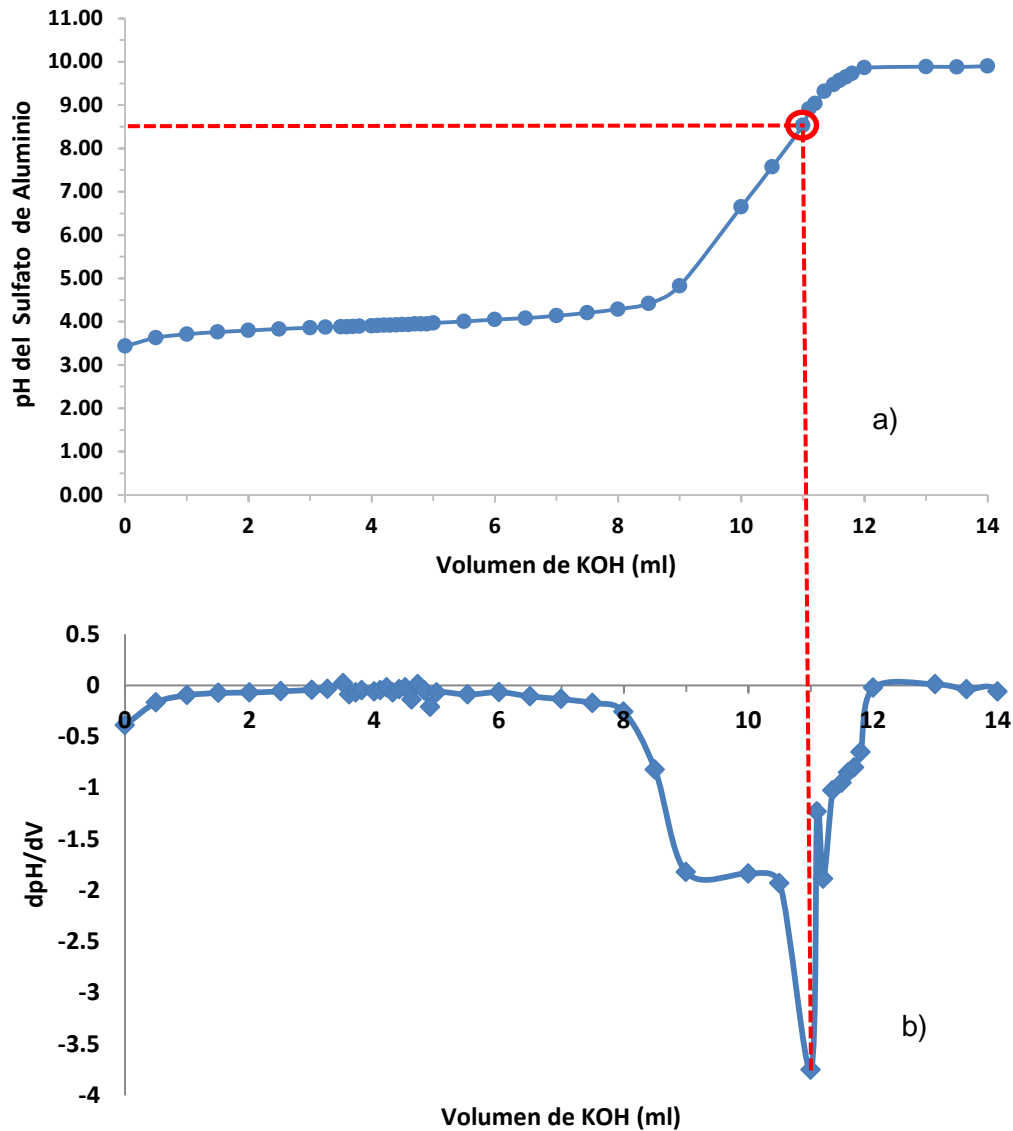


Figura 6.1 (a) Gráfica de la variación del pH respecto al volumen de KOH empleado para la obtención de la curva de titulación del sulfato de aluminio. (b) Curva de Gran de Sulfato de Aluminio y relación con el volumen de KOH.

En la tabla 6.3 se muestran los resultados de la titulación del mismo coagulante incorporando KNO_3 como electrolito soporte, con el objetivo de minimizar las interacciones moleculares del disolvente. Se observa en la figura 6.2, con respecto a la figura 6.1 sin electrolito soporte, que aparece en el caso (a) una deformación en la sigmoide; sin embargo la curva de Gran, figura 6.2 (b), con el amortiguador electrolítico presentó un

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

mínimo (debido a la primera derivada) optimizado con un pH en la zona ácida de 5. Se observa que se utiliza menos volumen de la base tituladora.

Tabla 6.3 Datos de la titulación del Sulfato de Aluminio – KNO_3 con KOH.

V KOH (ml)	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	3.523	-0.18	0.50	-0.37
0.50	3.707	-0.08	0.50	-0.15
1.00	3.783	-0.04	0.50	-0.09
1.50	3.827	-0.04	0.50	-0.07
2.00	3.863	-0.03	0.50	-0.07
2.50	3.896	-0.02	0.50	-0.04
3.00	3.917	-0.03	0.50	-0.06
5.50	4.110	-0.04	0.50	-0.08
6.00	4.150	-0.11	0.50	-0.22
6.50	4.260	-0.15	0.50	-0.30
7.00	4.410	-0.43	0.50	-0.87
7.50	4.843	-1.26	0.50	-2.52
8.00	6.105	-0.93	0.50	-1.86
8.50	7.033	-1.29	0.50	-2.57
9.00	8.319	-1.08	0.50	-2.16
9.50	9.397	-0.44	0.50	-0.88
10.00	9.837	-0.22	0.50	-0.44
10.50	10.055	-0.15	0.50	-0.30
11.00	10.204	-0.12	0.50	-0.24
11.50	10.326	-0.09	0.50	-0.18
12.00	10.416	-0.10	0.50	-0.19
12.50	10.512	-0.26	0.50	-0.53
13.00	10.777	-0.73	0.50	-1.47
23.50	12.705	-0.01	0.50	-0.02
25.00	12.746	12.75	-25.00	-0.51

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

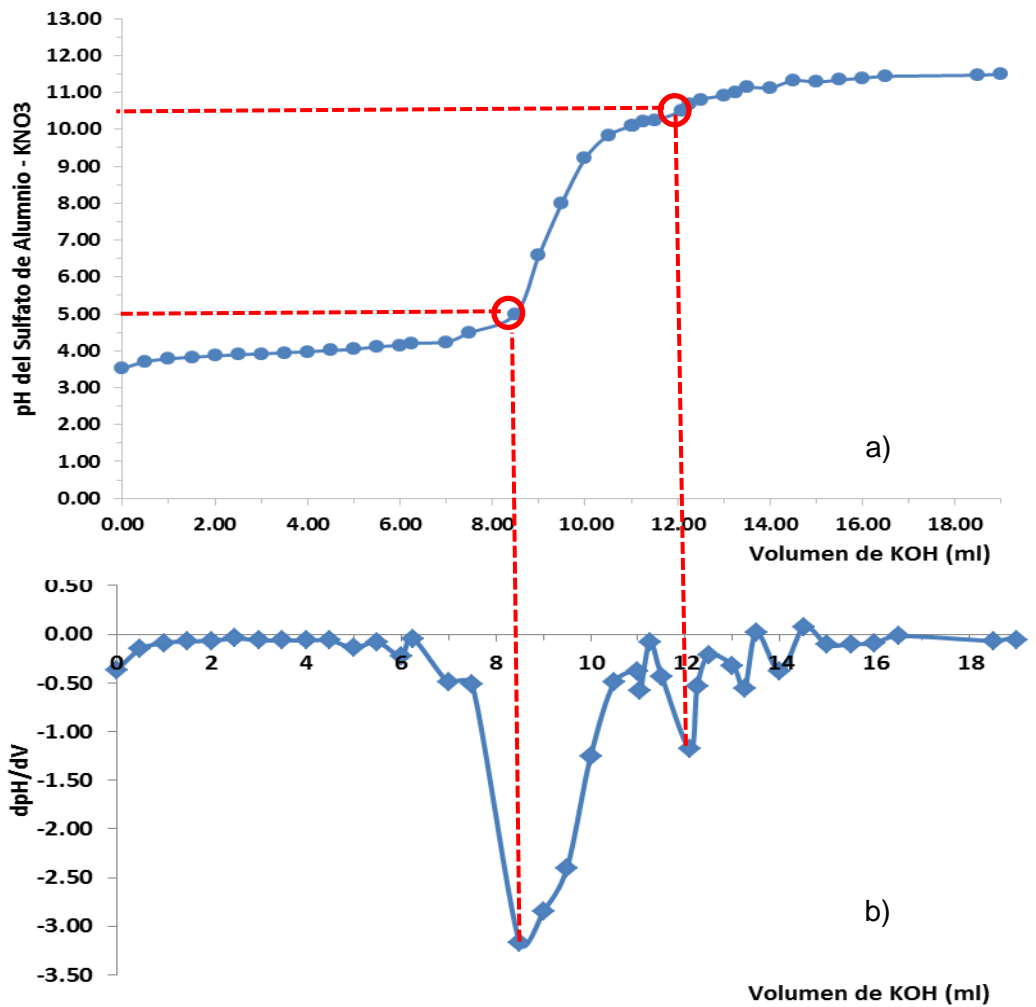


Figura 6.2 (a) Gráfica de la variación del pH respecto al volumen de KOH empleado. (b) Curva de Gran de Sulfato de Aluminio con KNO₃ y relación con el volumen de KOH.

Derivado del análisis de las gráficas mostradas anteriormente, se observar que el rango en el que se encuentra el pH óptimo para el proceso de Coagulación-Floculación se encuentra entre 5 y 10, siendo más cercano a 5 de acuerdo al valor de la primera derivada.

6.2.2 Coagulante extraído de semillas de moringa

A continuación se presentan las gráficas de titulación del coagulante de moringa y su curva de Gran.

Tabla 6.4 Datos de la titulación del coagulante de semillas de moringa.

V KOH (ml)	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	6.481	-2.470	0.100	-24.700
0.10	8.951	-0.484	0.100	-4.840
0.20	9.435	-0.743	0.100	-7.430
0.30	10.178	-0.550	0.100	-5.500
0.40	10.728	-0.505	0.100	-5.050
1.50	12.140	-0.056	0.100	-0.560
3.00	12.517	-0.006	0.100	-0.060
4.00	12.640	-0.009	0.100	-0.090
5.00	12.72	-0.008	0.100	-0.080
5.10	12.73	-0.008	0.100	-0.080
5.20	12.74	-0.007	0.100	-0.070
5.30	12.75	-0.005	0.100	-0.050
5.40	12.75	-0.006	0.100	-0.060
5.50	12.76	-0.007	0.100	-0.070
5.60	12.77	-0.006	0.100	-0.060
5.70	12.77	-0.006	0.100	-0.060
5.80	12.78	-0.006	0.100	-0.060
5.90	12.78	-0.006	0.100	-0.060
6.00	12.79	12.789	0.100	127.890

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

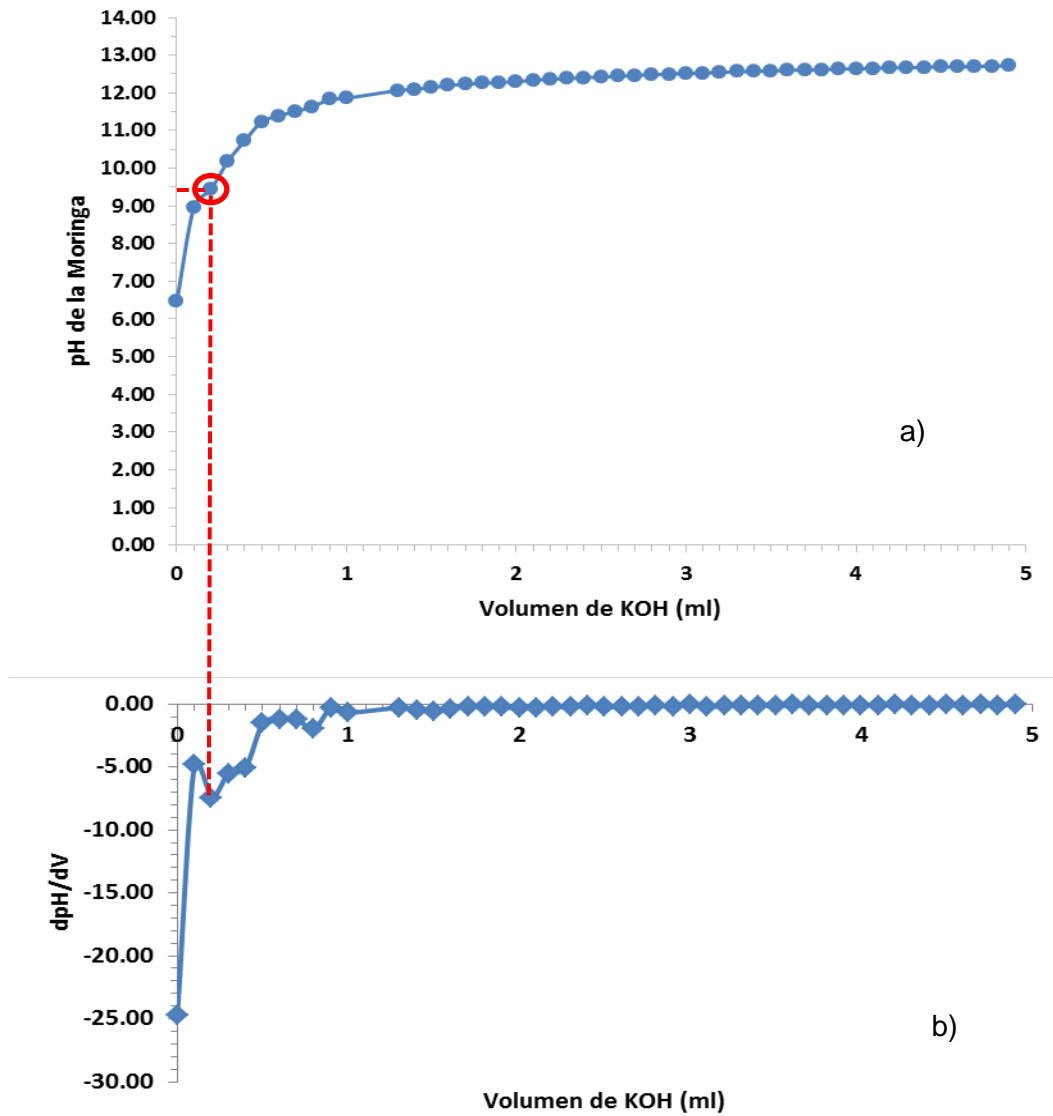


Figura 6.3(a).Gráfica de la variación del pH de la semilla de moringa respecto al volumen de KOH empleado. (b) Curva de Gran de la semilla de moringa y relación con el volumen de KOH.

En la tabla 6.4, se puede observar que el valor óptimo para este caso fue de un pH de 9.5 con un volumen de la base KOH de 0.3 ml y la primera derivada de -5.5, no utilizándose electrolito soporte. Si se compara este caso con el semejante, respecto al $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, se puede observar que el pH óptimo se encuentra en la región alcalina con un pH=9.5 que se indica con más precisión en la tabla 6.4, así en este caso la semilla de moringa alcanza más rápido el proceso de coagulación.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Además en este caso la cantidad de KOH es muy pequeña, en la figura 6.3 (a) y 6.3 (b) se observa la rapidez con que se logra el pH óptimo, donde la primera derivada es mucho más pequeña que en el caso del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

Tabla 6.5 Datos de la titulación del coagulante de semilla de moringa - KNO_3 con KOH

V KOH (ml)	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	5.486	-1.363	0.10	-13.630
0.10	6.849	-0.771	0.10	-7.710
0.20	7.620	-2.490	0.10	-24.900
0.30	10.110	-0.666	0.10	-6.660
0.40	10.776	-0.520	0.10	-5.200
0.50	11.296	-0.219	0.10	-2.190
1.00	11.893	-0.040	0.10	-0.400
1.50	12.114	-0.033	0.10	-0.330
1.60	12.147	-0.043	0.10	-0.430
1.70	12.190	-0.026	0.10	-0.260
1.80	12.216	-0.059	0.20	-0.295
2.00	12.275	-0.048	0.20	-0.240
2.80	12.433	-0.020	0.10	-0.200
2.90	12.453	-0.024	0.10	-0.240
3.00	12.477	-0.007	0.10	-0.070
3.40	12.525	-0.015	0.10	-0.150
3.50	12.540	-0.016	0.10	-0.160
4.00	12.602	0.002	0.10	0.020
4.80	12.673	-0.004	0.10	-0.040
4.90	12.677	-0.008	0.10	-0.080
5.00	12.685	-0.014	0.10	-0.140
5.50	12.727	-0.011	0.10	-0.110
5.60	12.738	-0.004	0.10	-0.040
5.70	12.742	-0.158	0.10	-1.580
5.80	12.900	12.900	-5.80	-2.224

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

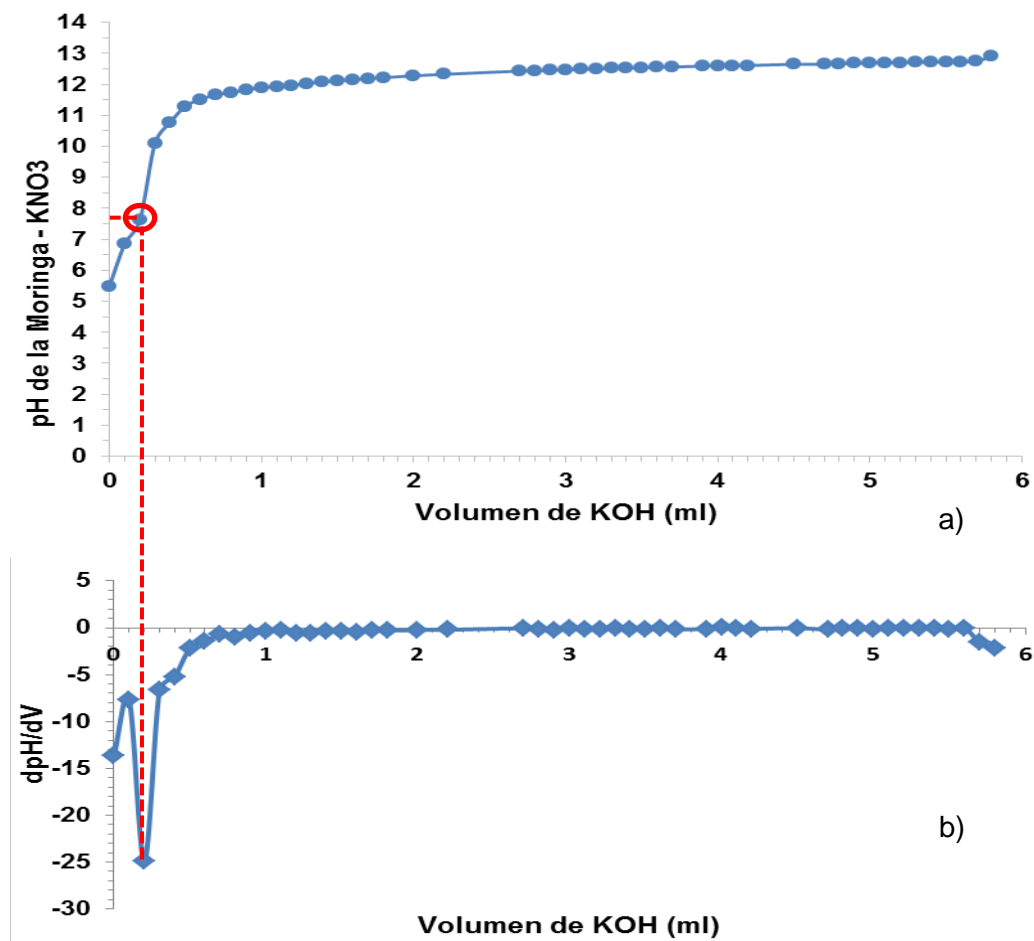


Figura 6.4(a) Gráfica de la variación del pH de la semilla de moringa como coagulante respecto al volumen de KOH, con KNO_3 como electrolito soporte. (b) Curva de Gran de la semilla de moringa con KNO_3 y relación con el volumen de KOH.

En el caso del uso de electrolito soporte, el volumen de KOH disminuyó ligeramente siendo el pico de la derivada más definido. El pH disminuyó un 25.15%, lo que indica que el electrolito soporte mejora la obtención del pH óptimo de trabajo para el coagulante extraído de semilla de moringa respecto al del sulfato de aluminio; en las mismas condiciones, la semilla de moringa presenta un mejor pH óptimo, cercano a las condiciones iniciales del agua a tratar. En las gráficas de la figura 6.4, se puede observar este comportamiento. También es importante en este caso la definición de la primera derivada cuando se utiliza el electrolito soporte disminuyendo de -5.5 a -25. En los dos coagulantes citados, se define mejor la obtención del pH óptimo cuando se usa electrolito soporte, lo que destaca la importancia de minimizar la fuerza iónica del disolvente,

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

también merece la pena mencionar su relación con la fuerte constante dieléctrica del agua de 78.5 a 25°C o 298°K (Perry, 1973, Manahan, 2000).

6.2.3 Quitosano sintetizado a partir de cáscara de camarón.

Para el caso del quitosano sintetizado a partir de cáscara de camarón, se realizaron los mismos procedimientos mostrados anteriormente, una titulación del coagulante sin electrolito soporte, y otra con KNO₃ como soporte para encontrar el pH óptimo para el proceso de coagulación.

Tabla 6.6 Datos de la titulación de quitosano sintetizado con KOH

V KOH (ml)	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	1.390	0.000	0.500	0.000
0.50	1.390	-0.004	0.500	-0.008
1.00	1.394	-0.003	0.500	-0.006
1.50	1.397	-0.206	0.500	-0.412
2.00	1.603	-0.230	0.500	-0.460
3.00	2.032	-0.690	1.000	-0.690
4.00	2.722	-1.044	1.000	-1.044
5.00	3.766	-1.123	1.000	-1.123
6.00	4.889	-1.334	0.500	-2.668
6.50	6.223	0.011	0.500	0.022
7.00	6.212	-0.245	0.500	-0.490
8.00	6.574	-0.224	0.500	-0.448
8.50	6.798	-0.890	0.500	-1.780
9.00	7.688	-3.462	0.500	-6.924
9.50	11.150	-0.488	0.500	-0.976
10.00	11.638	-0.235	0.500	-0.470
13.00	12.317	-0.055	0.500	-0.110
14.00	12.412	-0.044	0.500	-0.088
15.00	12.495	-0.035	0.500	-0.070
20.00	12.717	-0.013	0.500	-0.026

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

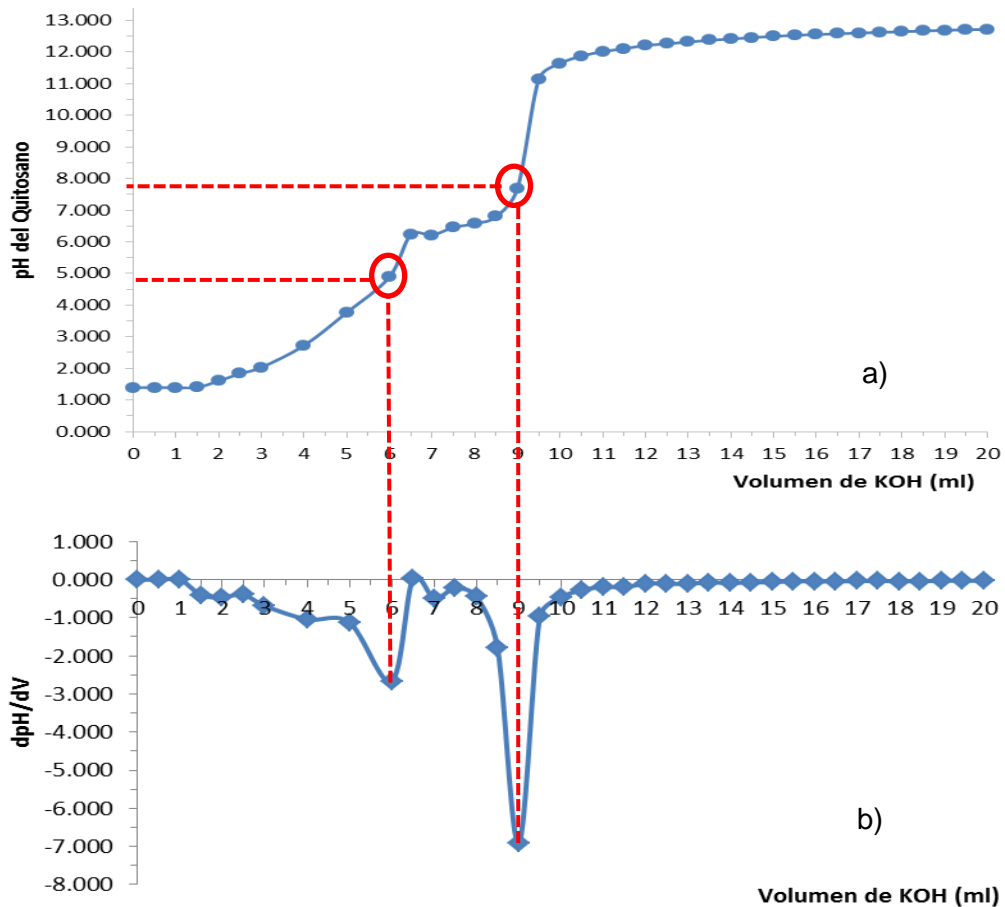


Figura 6.5(a).Gráfica de la variación del pH del quitosano respecto al volumen de KOH. (b) Curva de Gran del quitosano y relación con el volumen de KOH.

En la tabla 6.6, se observa que para el caso del quitosano se encuentran dos valores interesantes de pH, siendo el primero de 4.9 y el segundo de 7.7, alcanzados con un volumen de KOH de 6 y 9 ml, respectivamente; sin utilizar electrolito soporte. Si se compara este caso con el de los coagulantes sulfato de aluminio y moringa, se puede observar como para el quitosano el pH óptimo se encuentra en la región ácida con un cercano a 5, que se indica con más precisión en la tabla 6.6.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 6.7 Datos de la titulación de quitosano sintetizado - KNO_3 con KOH

V KOH (ml)	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	1.560	-0.161	1.00	-0.161
1.00	1.721	-0.281	1.00	-0.281
2.00	2.002	-1.273	1.00	-1.273
3.00	3.275	-2.156	0.50	-4.312
3.50	5.431	-0.133	0.10	-1.330
3.60	5.564	-0.095	0.10	-0.950
3.70	5.659	-0.078	0.10	-0.780
3.80	5.737	-0.120	0.20	-0.600
4.00	5.857	-0.131	0.20	-0.655
4.60	6.173	-0.095	0.20	-0.475
4.80	6.268	-0.076	0.20	-0.380
5.00	6.344	-0.060	0.20	-0.300
5.20	6.404	-0.049	0.20	-0.245
5.40	6.453	-0.022	0.20	-0.110
5.60	6.475	-0.085	0.40	-0.213
6.00	6.560	-0.280	0.50	-0.560
6.50	6.840	-0.360	0.50	-0.720
7.00	7.200	-0.956	0.50	-1.912
7.50	8.156	-2.903	0.50	-5.806
8.00	11.059	-0.529	0.50	-1.058
8.50	11.588	-0.216	0.50	-0.432
9.00	11.804	-0.155	0.50	-0.310
9.50	11.959	-0.122	0.50	-0.244
10.00	12.081	-0.071	0.50	-0.142
12.00	12.339	-0.033	0.50	-0.066
14.00	12.459	-0.022	0.50	-0.044
14.50	12.481	-0.025	0.50	-0.050
15.00	12.506	-0.016	0.50	-0.032
15.50	12.522	-0.020	0.50	-0.040
16.00	12.542	-0.016	0.50	-0.032
20.00	12.650	-0.010	0.50	-0.020

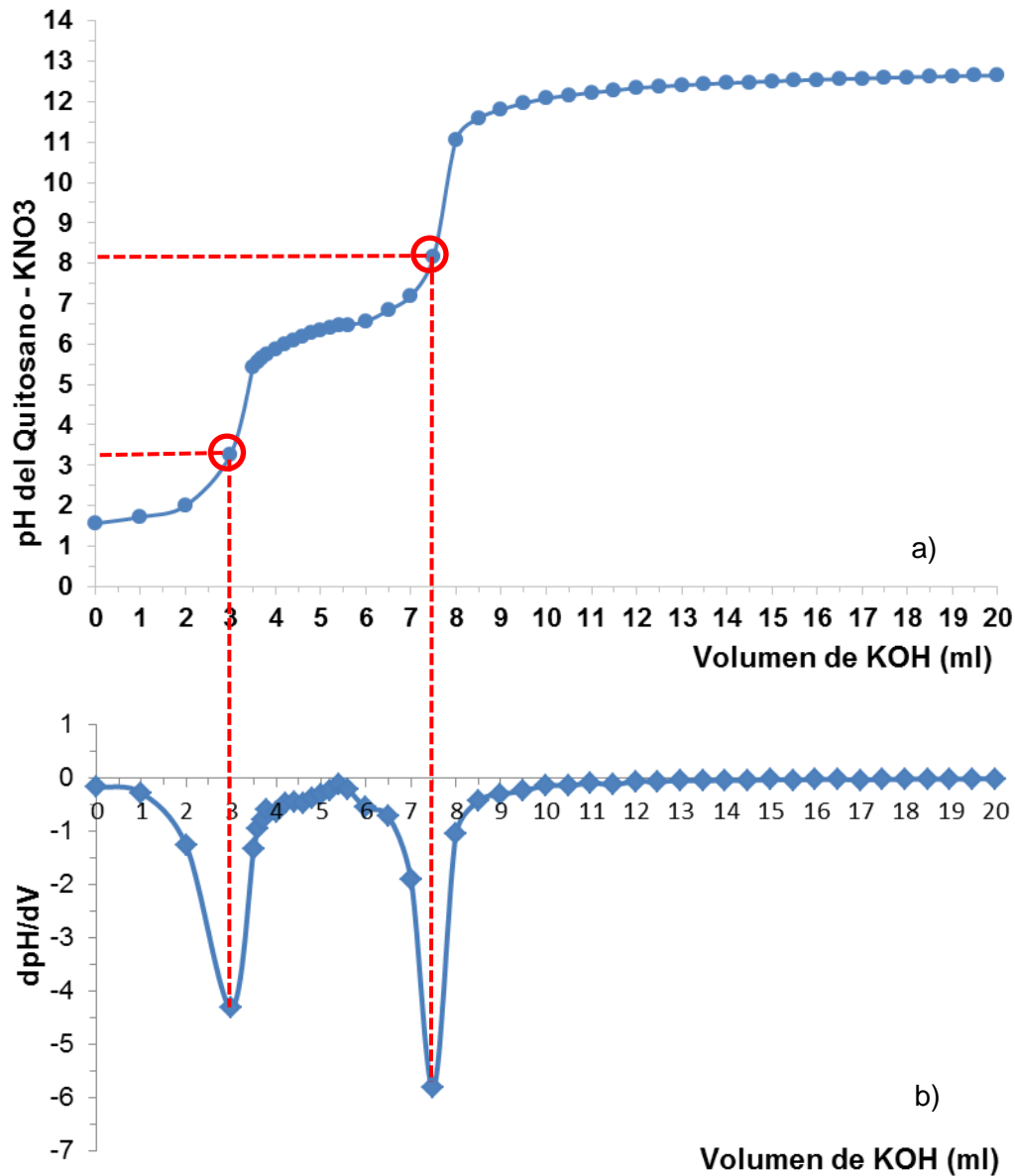


Figura 6.6(a).Gráfica de la variación del pH del quitosano con electrolito soporte KNO_3 respecto al volumen de KOH. **(b)** Curva de Gran del quitosano con KNO_3 y relación con el volumen de KOH.

En la figura 6.6, que muestra los resultados del estudio de acidez superficial de quitosano con electrolito soporte, con KOH, se pueden observar dos picos importantes en la Curva de Gran (figura 6.6 b), que corresponden a los valores de pH de 3.3 y 8.2, respectivamente; sin embargo, se aprecia que el pico que aparece con un volumen de 7.5 y un pH de 8.2 es más intenso, debido al valor de la primera derivada, lo cual indica que éste es el pH óptimo para el proceso de coagulación. De igual manera, se aprecia que este valor de pH se encuentra cercano a los valores iniciales de pH del agua.

6.3 Determinación de metales en las semillas de *Moringa oleífera*

Conocer la presencia de metales en el coagulante extraído de las semillas de moringa fue fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que uno de los objetivos es no aportar metales a los lodos que se generen en el proceso de sedimentación de los coloides desestabilizados. Se realizaron análisis de Absorción Atómica con un equipo SOLAAR M6 Thermo Elemental, los metales que se determinaron fueron: Ca, Cu, Fe, K, Fe, Mn y Na.

Tabla 6.8 Metales determinados en las semillas de moringa

Metal	Contenido en mg/L			
	Digestión 1	Digestión 2	Digestión 3	Promedio
Ca	3.0301	2.8506	2.7727	2.8845
Cu	*	*	*	*
Fe	*	*	*	*
K	1.4184	1.4289	1.5073	1.4515
Mn	*	*	*	*
Na	0.1463	0.1343	0.1915	0.1574

* Debajo del límite de detección del equipo, los límites para Cu son 0.033 mg/L, para Fe 0.05 mg/L, y para Mn 0.02 mg/L.

Como muestra la tabla 6.8, estos análisis se hicieron por triplicado, y también se realizó el análisis de metales contenidos en un estándar de referencia, para poder eliminar a los metales contenidos en el agua desionizada. Para esta prueba se preparó el coagulante de semillas de moringa del mismo modo en que fue utilizado en las pruebas de jarras, es decir, con una concentración de 10 mg/L. Se puede observar que el contenido de Cu, Fe y Mn está por debajo del límite de detección, es decir, es menor a 0.033 mg/L para Cu, menor a 0.05 mg/L para Fe y menor a 0.1463 mg/L en el caso de Mn. El contenido de Ca fue el mayor de todos, con un promedio de 2.8845 mg/L, seguido por K con 1.4515 mg/L, y finalmente Na con 0.1574. Los resultados anteriormente descritos muestran el bajo contenido de metales presentes en el coagulante.

6.4 Caracterización de quitosano

6.4.1 Caracterización del Quitosano con IR

La determinación del espectro IR para cada una de la variedades de quitosano (alta, media y baja viscosidad) proporciona información para conocer los grupos funcionales que integran la estructura molecular de cada variedad, esto nos permite determinar, en

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

función de la viscosidad y de los grupos hidroxilo, cuál será el que actúe como mejor coagulante.

En la figura 6.7 se muestran los espectros IR de cada variedad de quitosano, en los cuales:

- ❖ Pueden ser observados los picos característicos del enlace N-H para la banda de aminas primarias con vibración de flexión y una intensidad de absorción fuerte en 1592.01 cm^{-1} .
- ❖ En el caso del enlace C-N, se presentan picos para la banda de aminas alifáticas en 1024.11 cm^{-1} con una vibración de tensión y una intensidad de absorción débil a media,
- ❖ Para el enlace O-H se ensancha con picos para la banda de alcoholes entre 3360.15 cm^{-1} y 3342.02 cm^{-1} con una vibración de tensión y una intensidad de absorción fuerte,
- ❖ El enlace C-O presenta un pico característico de la banda de los alcoholes primarios en 1058.42 cm^{-1} con una vibración de tensión y una intensidad de absorción media,
- ❖ El enlace -C-H presenta un pico característico en 2871.32 cm^{-1} con una vibración de tensión y una intensidad de absorción media a fuerte,
- ❖ Para el enlace $-\text{CH}_3$ presenta un pico en 1374.24 cm^{-1} con una vibración de flexión y una intensidad de absorción media a fuerte.
- ❖ El enlace C-N presenta un pico en 1313.12 cm^{-1} con una vibración de tensión y una intensidad de absorción débil a media,
- ❖ El caso del enlace $-\text{CH}_2$, presenta un pico en 1419.58 cm^{-1} con una vibración de flexión y una intensidad de absorción media a fuerte, en la banda del Alcohol secundario en 1149.81 cm^{-1} ,
- ❖ Para el enlace C-C presenta un tipo de enlace conjugado en 1653.62 cm^{-1} .

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

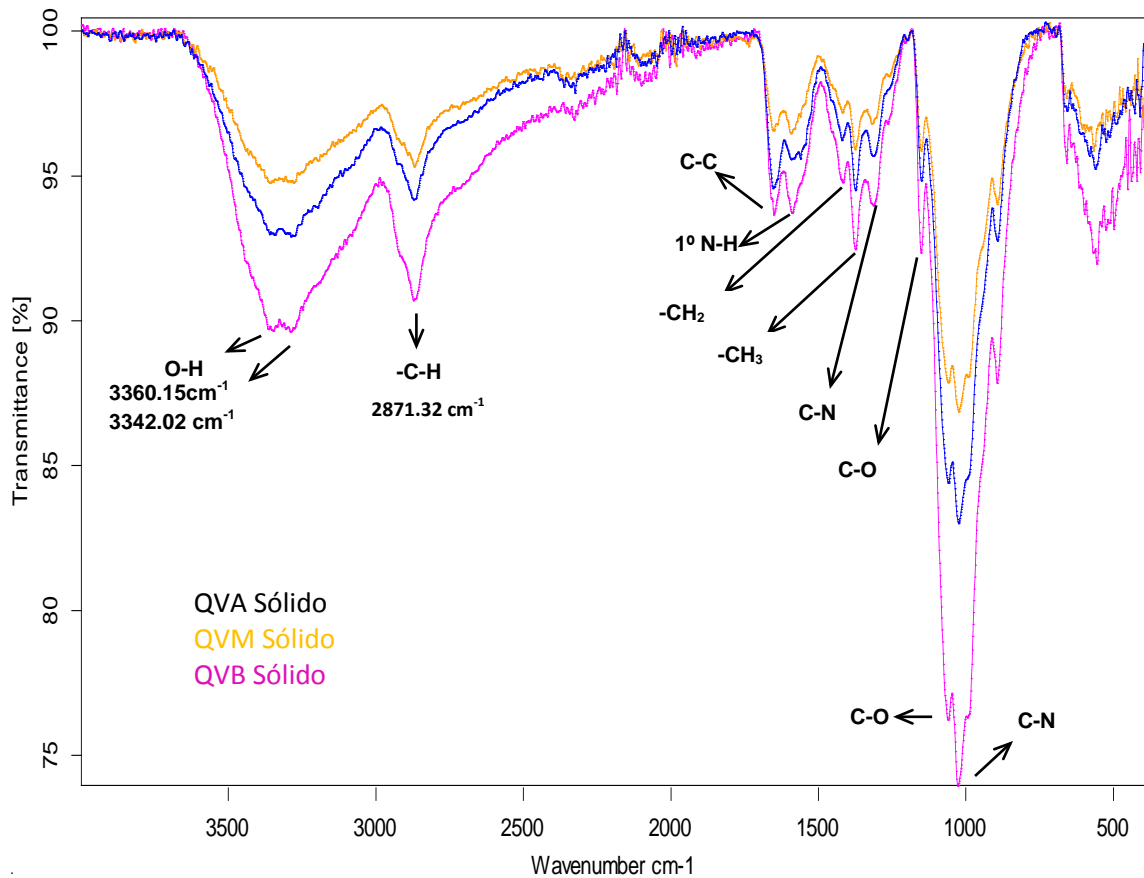


Figura 6.7 Espectros IR de Quitosano de viscosidad alta (QVA), viscosidad media (QVM) y viscosidad baja (QVB). Tomado de la tesis de Martínez González, (2008), tres quitosanos comerciales.

Las tres variedades de quitosano comercial provenientes del caparazón de jaiba presentaron la forma alfa (α), donde los radicales (-OH y CH_2OH) están en posición cis, es decir, en el mismo lado del plano; mientras que en la forma beta (β) el grupo hidroxilo, el (-OH) del carbono 1 está en posición trans. Si el OH del carbono 1 está hacia abajo es alfa y si está hacia arriba, es beta.

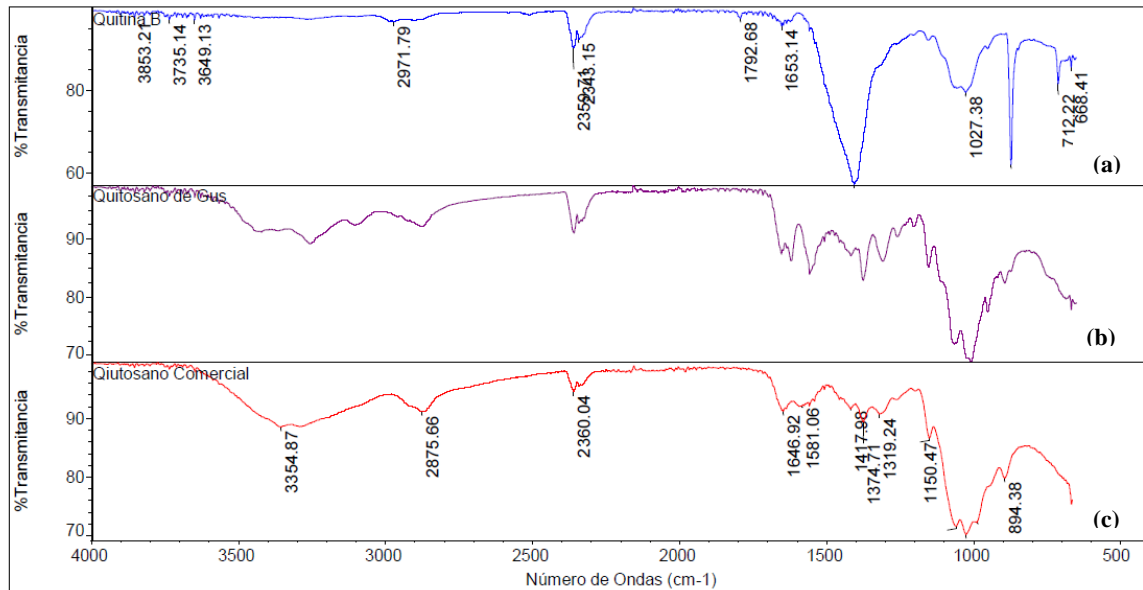


Figura 6.8. (a) Comparación de los espectros de quitina blanqueada. (b) quitosano sintetizado y quitosano comercial de viscosidad media.

En la imagen 6.8 se puede observar la comparación de los espectros de quitina blanqueada a partir de la cáscara de camarón; de quitosano sintetizado, y de quitosano comercial de viscosidad baja. Como se muestra en el espectro de la quitina blanqueada, se observa la presencia de un pico intenso en 1400 cm^{-1} , característico de la tensión del enlace $\text{CH}_3\text{-C=O}$ (Jiménez, 2009), el cual desaparece cuando se realiza la transformación de quitina en quitosano, mostrando así el paso de desacetilación de la quitina en el proceso de síntesis de quitosano. Comparando los espectros de quitosano sintetizado a partir de cáscara de camarón, y el quitosano comercial, se puede observar una gran similitud entre ambos espectros, mostrando pequeñas diferencias asociados a las impurezas del quitosano sintetizado a partir de los residuos de cáscara de camarón y de los aditivos de quitosano comercial.

6.4.2 Caracterización del Quitosano con Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

En las siguientes imágenes se muestra la superficie de cada una de las variedades de quitosano, estas imágenes fueron obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido de alta resolución (MEB).

En la figura 6.9, se puede observar en el quitosano de viscosidad alta la presencia de hojuelas, con superficies lisas, de consistencia laminar compacta con rugosidades suaves.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

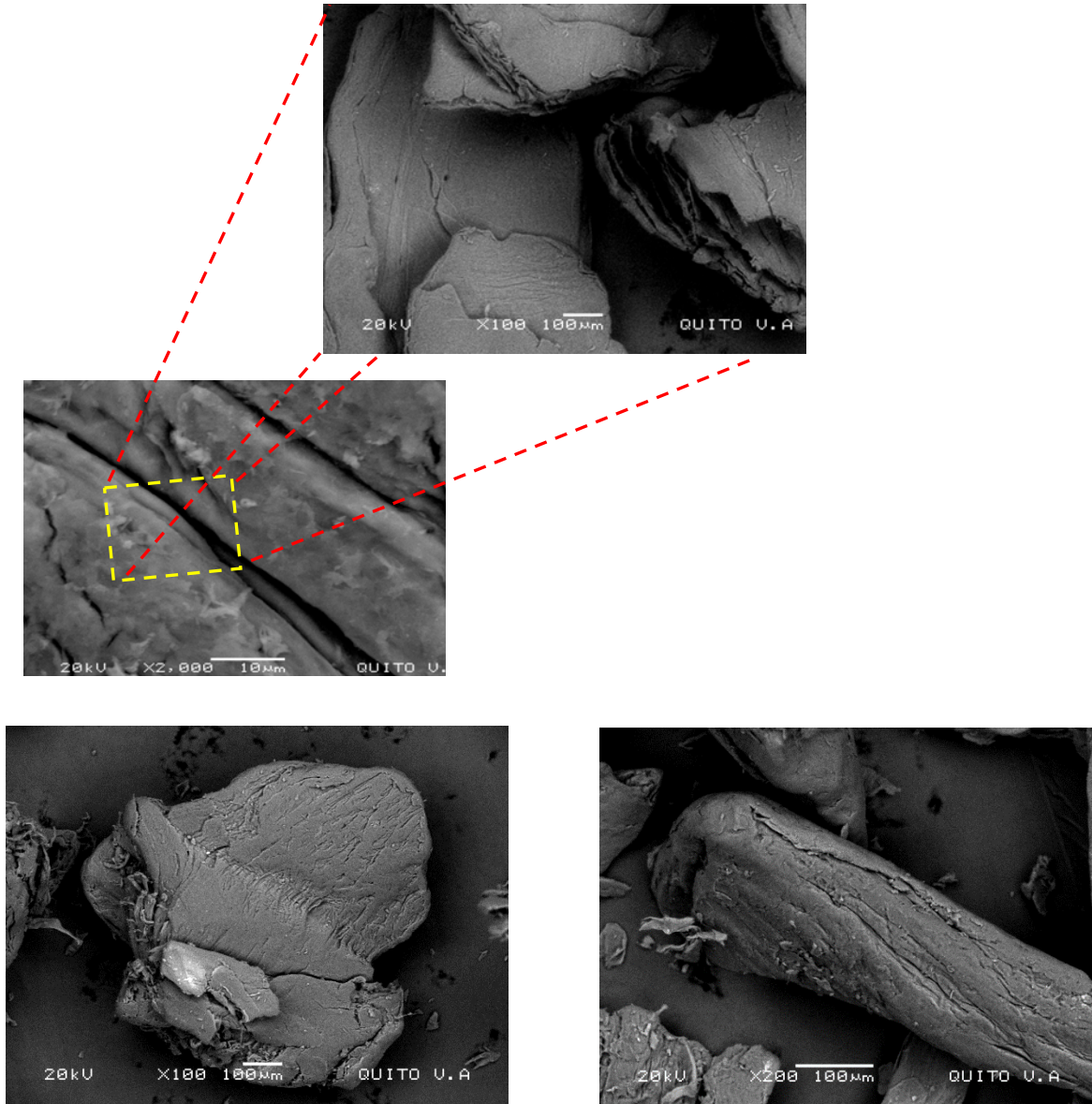


Figura 6.9 MEB del quitosano de viscosidad alta.

En la figura 6.10 se muestran fotografías de MEB del quitosano de viscosidad media, donde se observa que presenta menos formas laminares, pero con superficies rugosas también suaves.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

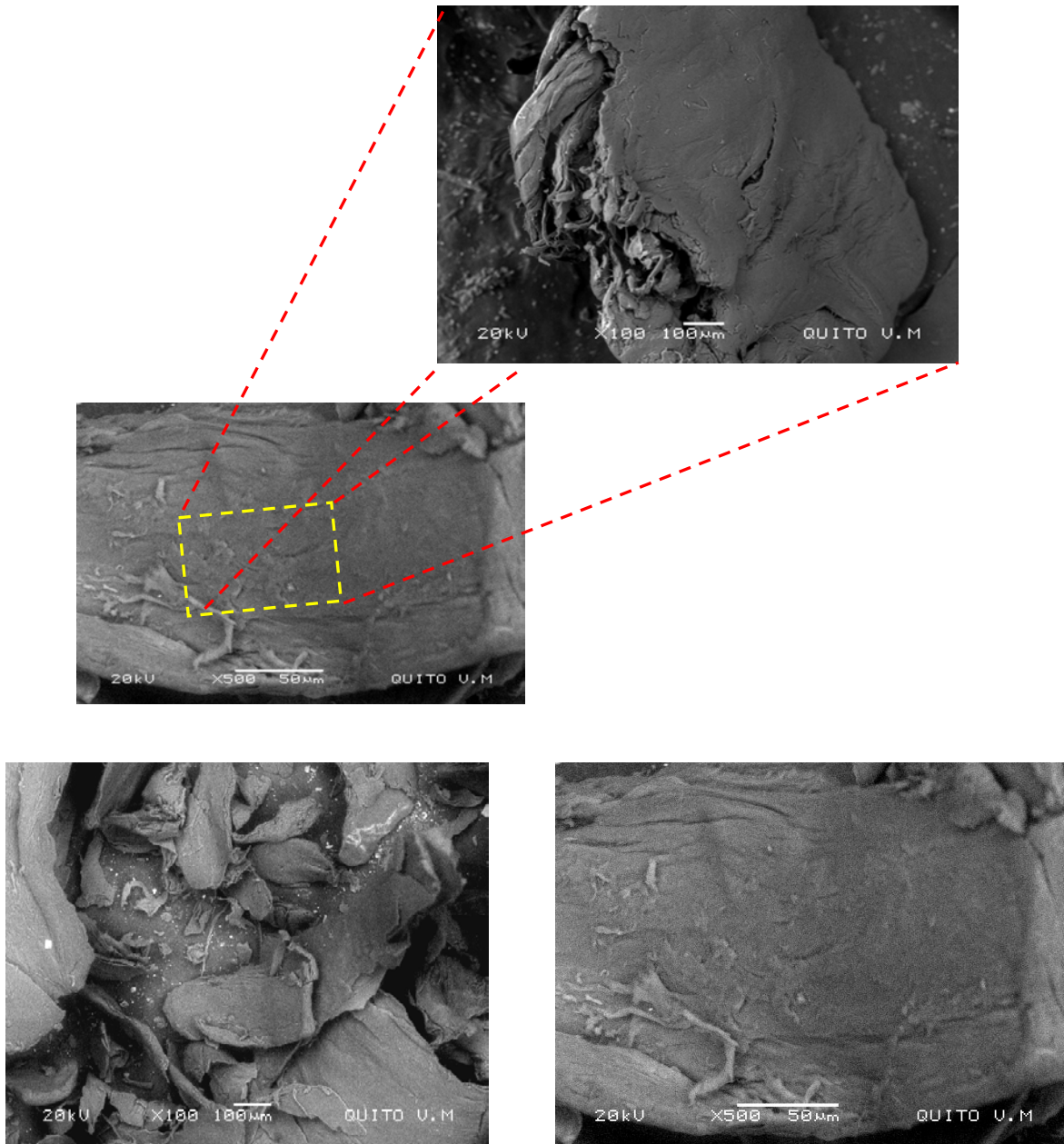


Figura 6.10 MEB del quitosano de viscosidad media.

La figura 6.11 corresponde al quitosano obtenido de la cáscara de camarón por MEB, se puede apreciar la formación de hojuelas con la presencia de cavidades, siendo su superficie menos lisa que en los otros dos casos y con superficies rugosas, quizá la influencia de la quitina y de los agregados del material comercial.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

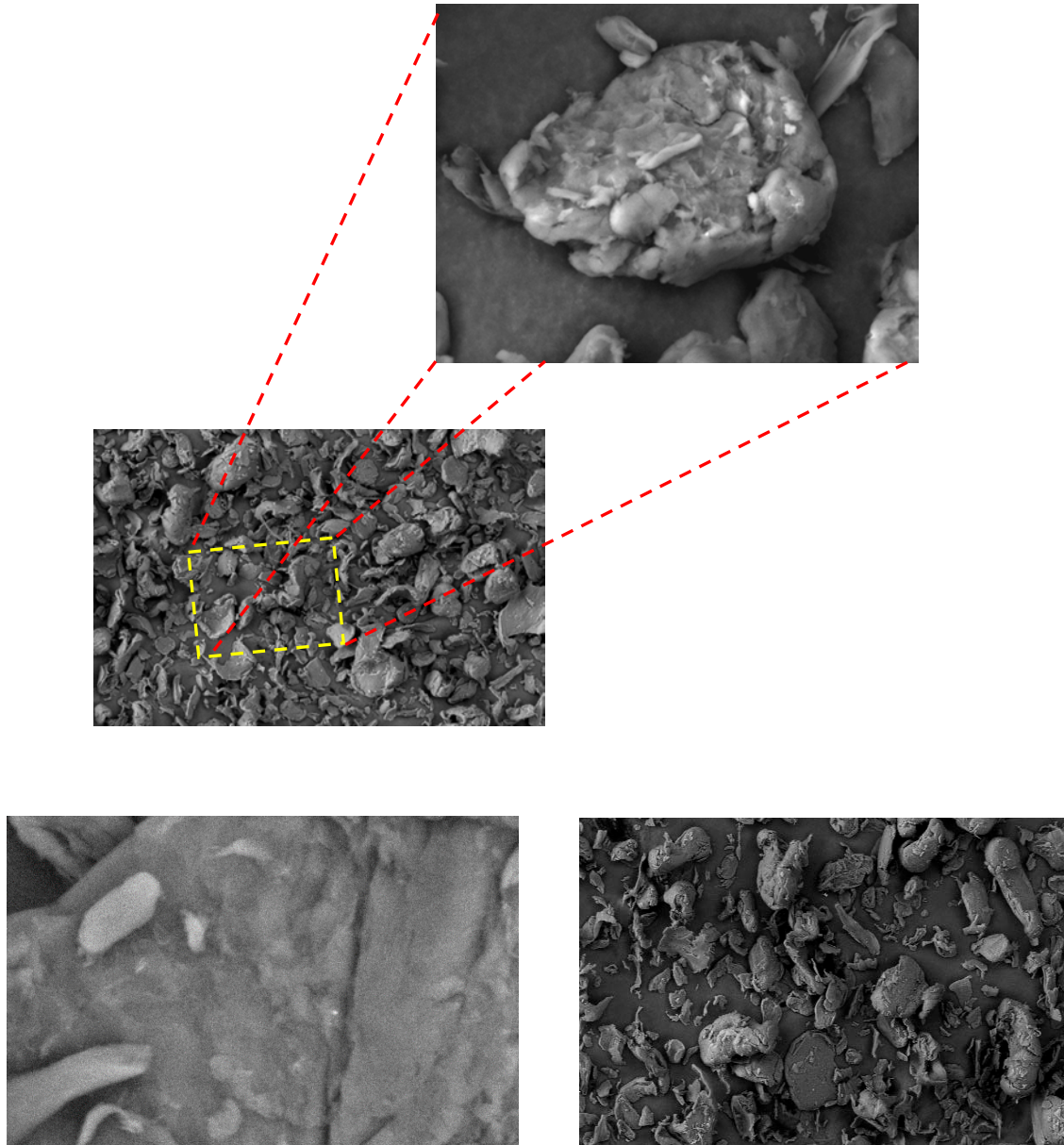
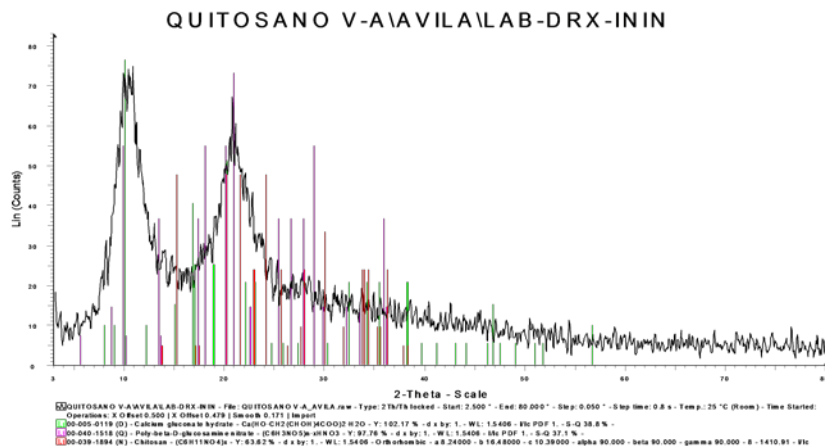


Figura 6.11 MEB del quitosano obtenido de la cáscara de camarón.

6.4.3 Fluorescencia de Rayos X

En las figuras 6.12, 6.13 y 6.14 se presentan los componentes menores del quitosano de alta, media y del obtenido de la cáscara de camarón. Para el quitosano de alta viscosidad los componentes son: Gluconato de Calcio Hidratado ($\text{Ca}(\text{HO}\cdot\text{CH}_2(\text{CHOH})_4\text{COO})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) en un 38.8 %, nitrato de Poli-beta-D-glucosamina ($\text{C}_6\text{H}_3\text{NO}_5)_n\cdot x\text{HNO}_3$) en un 37.1 %, y Quitosano ($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}_4)_x$) en un 24.1%.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”



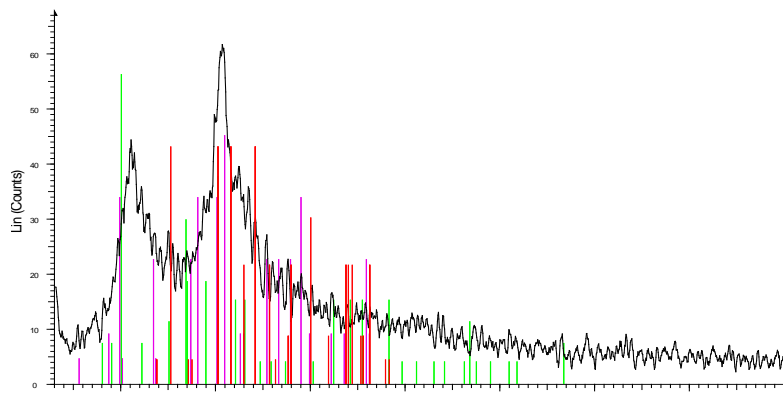
QUITOSANO V -A\ Type: 2Th/Th locked - Start: 2.500° -End:80.000° - Step: 0.050° - Step time: 0.8s- Temp.: 25 °C(Room)



00-005-0119 (D)- Calcium gluconate hydrate- $\text{Ca}(\text{HO}\cdot\text{CH}_2(\text{CHOH})_4\text{COO})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ - Y: 102.17%- d x by: 1. -WL:1.5406- l/lc PDF 1.-S-Q 38.8%
 00-040-1518 (Q)- Poly-beta-D-glucosamine nitrate- $(\text{C}_6\text{H}_3\text{NO}_5)_n\cdot\text{xHNO}_3$ - Y: 97.76%- d x by: 1. -WL:1.5406- l/lc PDF 1.-S-Q 37.1%
 00-039-1894 (N)- Chitosan- $(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}_4)_x$ - Y:63.62%- d x by: 1.- WL:1.5406- Orthorhombic- a 8.24000 - b 16.48000- c 10.39000-
 alpha 90.000- beta 90.000- gamma 90.000- delta 1410.91 - l/lc

Figura 6.12: Componentes menores del quitosano de viscosidad alta.

Para el quitosano de viscosidad media, los componentes son: nitrato de Poli-beta-D-glucosamina ($\text{C}_6\text{H}_3\text{NO}_5$) $_n\cdot\text{xHNO}_3$) en un 38.9 %, Gluconato de Calcio Hidratado (Calcium gluconate hydrate- $\text{Ca}(\text{HO}\cdot\text{CH}_2(\text{CHOH})_4\text{COO})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) en un 38.9 %, Quitosano (Chitosan- $(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}_4)_x$) en un 22.2%.



QUITOSANO VMType: 2Th/Th locked- Start: 2.500° -End:80.000° - Step:0.050° - Step time: 0.8s- Temp.:25 °C(Room)



00.040-1518 (Q)- Poly-beta-D-glucosamine nitrate- $(\text{C}_6\text{H}_3\text{NO}_5)_n\cdot\text{xHNO}_3$ - Y:91.17%- d x by: 1.- WL1.5406- l/lc PDF 1.-S-Q 38.9%
 00.005-0199(D)- Calcium gluconate hydrate- $\text{Ca}(\text{HO}\cdot\text{CH}_2(\text{CHOH})_4\text{COO})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ - Y:91.17%- d x by: 1.- WL: 1.5406- l/lc PDF 1.- S-Q 38.9%
 00.039-1894(N)- Chitosan- $(\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}_4)_x$ - Y:69.83%- d x by:1- WL: 1.5406- Orthorhombic- a 8.24.000- b 16.4800- c 10.3900- alpha
 90.000- beta 90.000- gamma 90.000- delta 1410.91- l/lc

Figura 6.13: Componentes menores del quitosano de viscosidad media

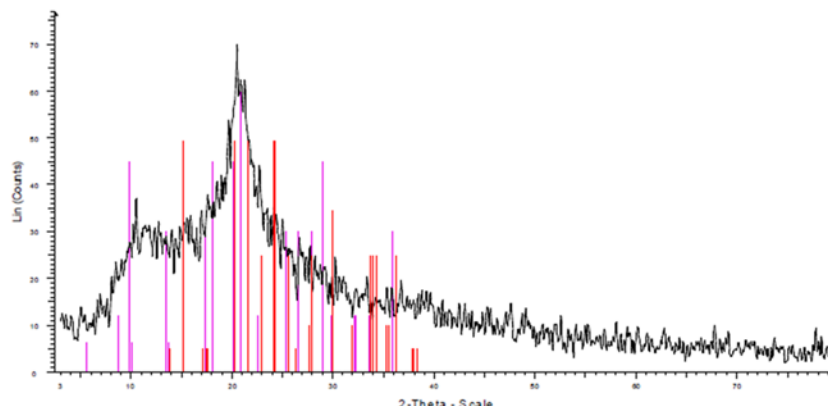


Figura 6.14: Espectro del quitosano de la cáscara de camarón.

Se observa según este espectro la obtención de un casi 90% de quitosano, por lo que el resto es quitina. En los casos anteriores (quitosano de viscosidad alta y media), dado que son comerciales se observan más componentes agregados en el espectro. Pero se utilizaron como comparación para la morfología en el caso del MEB y la composición, en el caso de los rayos X con fluorescencia.

Tabla 6.9 Componentes de las diferentes variedades de quitosano comerciales de diferente viscosidad.

Componentes	Viscosidad alta	Viscosidad media	Cáscara de camarón
Gluconato de Calcio Hidratado ($\text{Ca}(\text{HO}\cdot\text{CH}_2(\text{CHOH})_4\text{COO})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$)	38.8 %,	38.9 %,	0%
Nitrato de Poli-beta-D-glucosamina ($\text{C}_6\text{H}_3\text{NO}_5)_n\cdot x\text{HNO}_3$)	37.1 %,	24.1 %.	0%
Quitosano ($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}_4$) $_x$)	24.1 %.	38.9 %,	85%

*Las viscosidades fueron para quitosano comercial

La tabla 6.9 muestra los principales componentes del quitosano de diferentes viscosidades. En el caso del obtenido de la cáscara de camarón, se observa que contiene un 15% de quitina, pero este compuesto puede ayudar a la coagulación. El quitosano fue obtenido después de eliminar el color de la quitina, que se tuvo que blanquear y posteriormente efectuar la desacetilación, obteniéndose un 85 % \pm 1.4 de quitosano. A pesar de los agregados en el quitosano comercial, se observa que las estructuras tienen una gran similitud, lo que soporta el estudio realizado indicando que el producto obtenido de la síntesis es quitosano.

6.5 Determinación de la dosis óptima con pruebas de jarras

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de jarras con los diferentes coagulantes, usando como testigo al sulfato de aluminio. Se realizaron pruebas preliminares con diferentes intervalos de dosis para encontrar la dosis óptima en cada caso, es decir, la dosis que permitió reducir la mayor la turbidez respecto a la inicial.

El equipo empleado para realizar dichas pruebas fue un JLT6 de Velp Scientifica, que se muestra en la figura 6.15.



Figura 6.15 Prueba de jarras con coagulante.

6.5.1 Pruebas con dosis de 0-300 mg/L

6.5.1.1 Sulfato de aluminio

Para la primera Prueba de Jarras que se realizó con sulfato de aluminio como coagulante, las dosis iniciales fueron seleccionadas a partir de la revisión bibliográfica, estas dosis fueron de 50, 100, 150, 200, 250 y 300 mg/L.

Como se puede observar en la tabla 6.10, las pruebas se realizaron por triplicado, en la parte inferior se encuentran el promedio de turbidez residual así como del porcentaje de remoción alcanzado con el coagulante. Se puede observar como conforme se incrementa la dosis se reduce la turbidez residual.

Tabla 6.10 Resultado de la prueba de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 0-300).

DOSIS	0	50	100	150	200	250	300
Repetición		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1 - Turbidez	673.00	82.00	66.33	56.67	37.33	29.00	17.67
2 - Turbidez	672.00	78.33	61.33	55.00	36.33	27.00	18.00
3 -Turbidez	663.67	79.00	64.33	61.00	44.67	22.67	10.33
Turbidez Residual Prom.	669.56	79.78	64.00	57.56	39.44	26.22	15.33
% Remoción	0.00	88.09	90.44	91.40	94.11	96.09	97.71

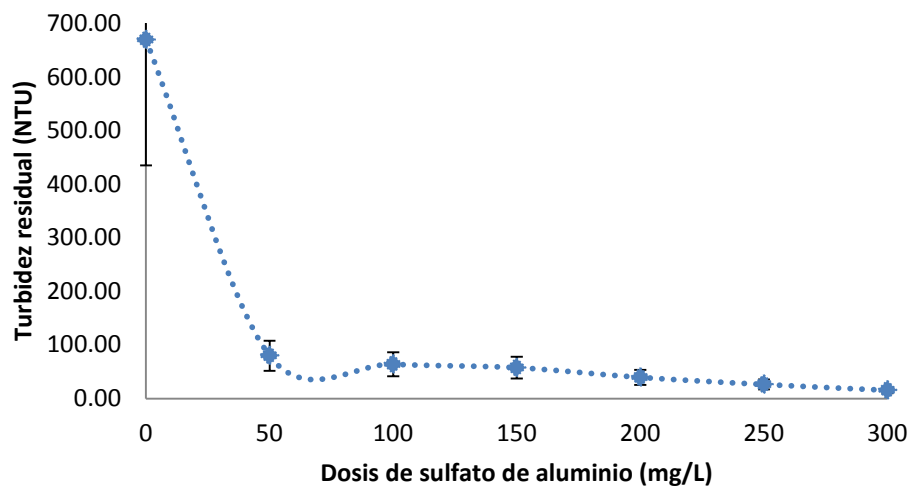


Figura 6.16 Turbidez residual vs dosis de sulfato de aluminio.

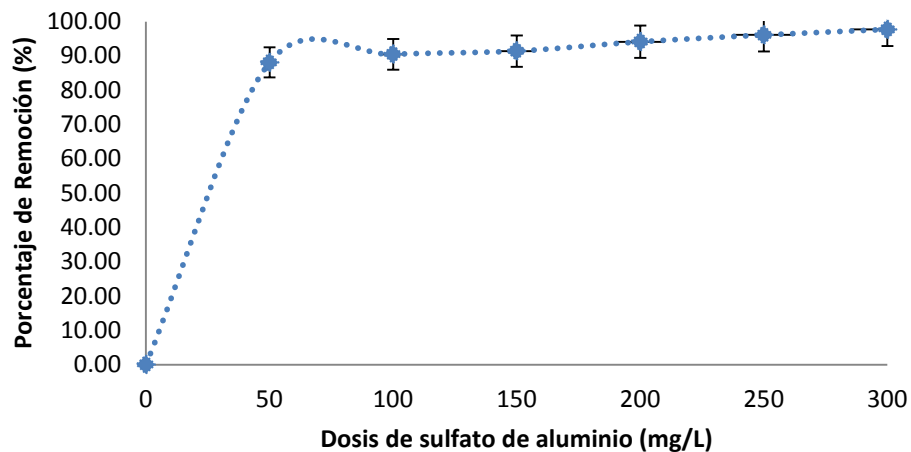


Figura 6.17 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de sulfato de aluminio.

En la figura 6.16 se puede apreciar el comportamiento lineal de la reducción de turbidez residual respecto a la dosis de sulfato de aluminio empleado, de la figura 6.17 se observa como con una dosis de 50 mg/L se alcanza un porcentaje de remoción del 88%, y a partir

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

de dosis de 100 mg/L el porcentaje de remoción es superior al 90%, sin embargo, no se observa un cambio significativo al trabajar con dosis mayores a 200 mg/L.

6.5.1.2 *Moringa oleifera*

En el caso particular del coagulante extraído de las semillas de *Moringa oleifera*, como se comentó en el capítulo 5, se probaron dos tipos de tratamientos para la extracción del componente activo de las semillas, en primer lugar se mostrarán los resultados de cada uno de los tratamientos y al final serán comparados, la tabla 6.11 muestra los resultados del tratamiento con NaCl.

Tabla 6.11 Resultados de la prueba de jarras con moringa con extracción con NaCl (Dosis 0-300).

DOSIS No.	0	50 mg/L	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L	250 mg/L	300 mg/L
1 - Turbidez	787.33	86.67	51.33	39.67	29.00	26.00	20.00
2 - Turbidez	816.00	88.00	50.00	41.00	30.00	27.00	21.00
3 - Turbidez	816.00	88.00	50.00	41.00	30.00	27.00	21.00
Turbidez Residual Prom.	806.44	87.56	50.44	40.56	29.67	26.67	20.67
% Remoción	0.00	89.14	93.74	94.97	96.32	96.69	97.44

En la figura 6.18 se puede apreciar el comportamiento de la turbidez residual conforme se incrementa la dosis del coagulante extraído de semillas de moringa, con el tratamiento con NaCl. Se puede observar una reducción de la turbidez residual de 806 NTU a 88 con una dosis de 50 mg/L.

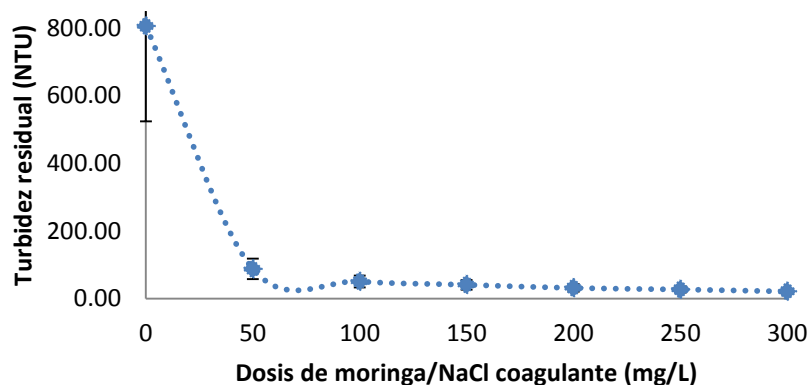


Figura 6.18 Turbidez residual vs dosis de moringa/NaCl.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

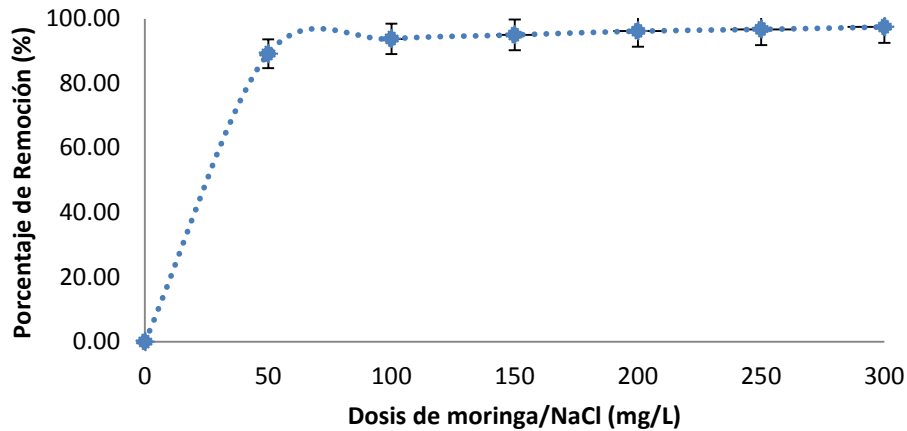


Figura 6.19 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de moringa/NaCl.

Derivado de la figura 6.19 se puede observar un rendimiento similar al obtenido con el sulfato de aluminio, alcanzando un porcentaje de remoción del 89% con una dosis de 50 mg/L, e incrementando su eficiencia de remoción de manera directamente proporcional al incremento de la dosis, alcanzando un porcentaje de remoción superior al 93% con dosis superiores a 100 mg/L, y un punto final con una dosis elevada (300 mg/L) para reducir en un 97% la turbidez inicial del agua.

A continuación se muestran los resultados de este mismo coagulante, pero con el tratamiento de extracción simple (con agua desionizada).

Tabla 6.12 Resultados de la prueba de jarras con moringa con extracción simple (Dosis 0-300).

DOSIS No.	0	50 mg/L	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L	250 mg/L	300 mg/L
1 - Turbidez	814.33	105.67	98.33	87.33	79.33	61.67	57.33
2 - Turbidez	816.00	108.00	100.00	88.00	79.00	62.00	59.00
3 - Turbidez	816.00	108.00	100.00	88.00	79.00	62.00	59.00
Turbidez Residual Prom.	815.44	107.22	99.44	87.78	79.11	61.89	58.44
% Remoción	0.00	86.85	87.80	89.24	90.30	92.41	92.83

Como se puede observar en la tabla 6.12, se muestran los resultados de las pruebas por triplicado con el coagulante de semillas de moringa mediante extracción simple (con agua desionizada). En la parte inferior se encuentran el promedio de turbidez residual así como del porcentaje de remoción alcanzado con el coagulante. Se puede observar como el porcentaje de remoción con una dosis de 50 mg/L es del 86.85%, alcanzando un

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

porcentaje de remoción superior al 90% a partir de dosis de 200 mg/L; sin embargo, es con este coagulante que se observan los menores incrementos en cuanto a eficiencia de remoción conforme se incrementa la dosis.

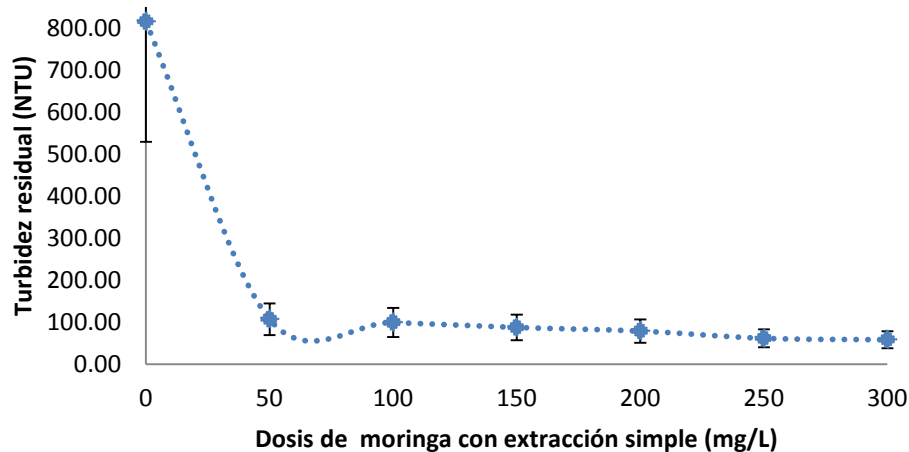


Figura 6.20 Turbidez residual vs dosis de moringa con extracción simple.

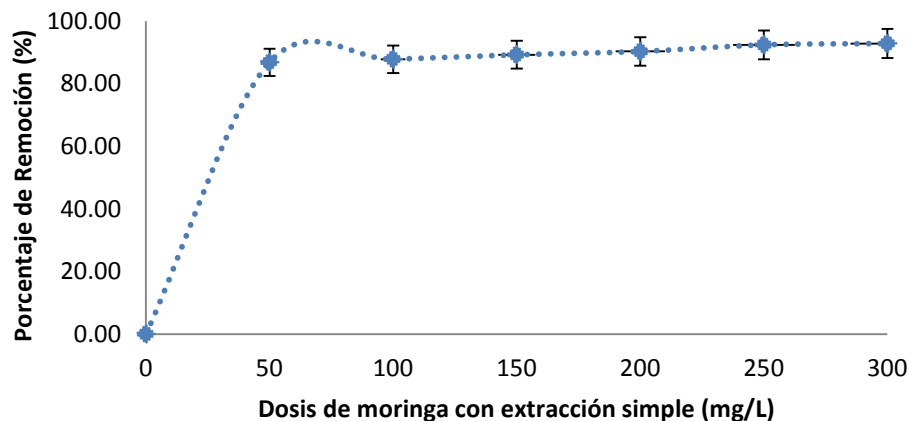


Figura 6.21 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de moringa con extracción simple.

Como se muestra en las figuras 6.20 y 6.21, con una dosis de este coagulante de 50 mg/L se alcanzó una remoción del 86% de turbidez, mientras que con el coagulante con tratamiento con NaCl, con esta misma dosis se obtuvo un porcentaje de remoción de 89%; se puede observar que el rendimiento del coagulante obtenido de las semillas de moringa con extracción simple es ligeramente menor al rendimiento de este coagulante con el tratamiento con NaCl.

6.5.1.3 Quitosano

En la siguiente tabla (6.13) se muestran los resultados de las pruebas preliminares realizadas con quitosano, usando el mismo intervalo de dosis mostrado en los coagulantes que se estudiaron previamente.

Tabla 6.13 Resultados de la prueba de jarras con quitosano (Dosis 0-300).

DOSIS No.	0	50	100	150	200	250	300
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1 - Turbidez	411.00	88.67	66.00	39.00	114.33	29.33	87.00
2 - Turbidez	412.67	93.00	68.67	41.67	99.33	30.67	87.00
3 - Turbidez	411.33	94.00	67.00	32.00	106.00	29.00	85.67
Turbidez Residual Prom.	411.67	91.89	67.22	37.56	106.56	29.67	86.56
% Remoción	0.00	77.68	83.67	90.88	74.11	92.79	78.97

Como se puede apreciar en la tabla 6.13, con una dosis de 50 mg/L se alcanza una remoción de 77.68%, y esta es superior al 90% a partir de dosis de 150 mg/L. A continuación se muestran las gráficas de turbidez residual vs dosis de coagulante y porcentaje de remoción vs dosis de coagulante.

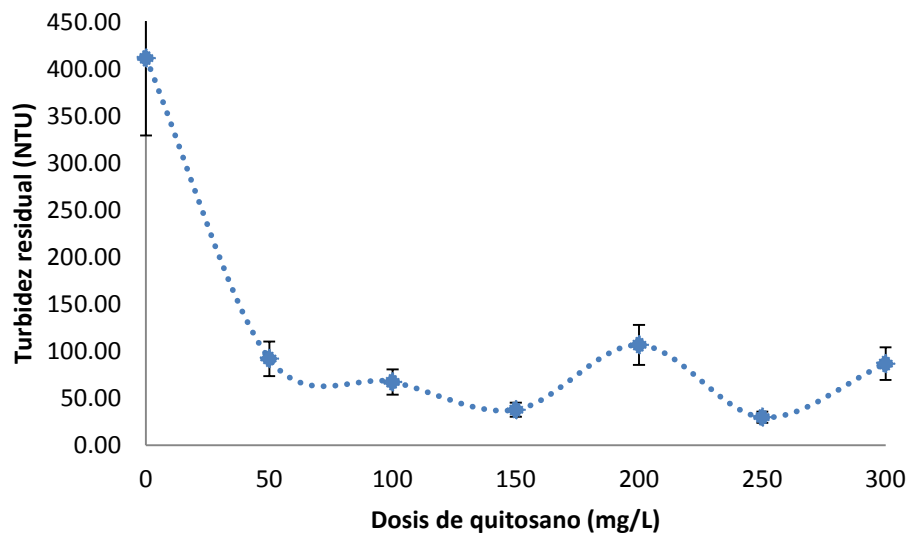


Figura 6.22 Turbidez residual vs dosis de quitosano.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

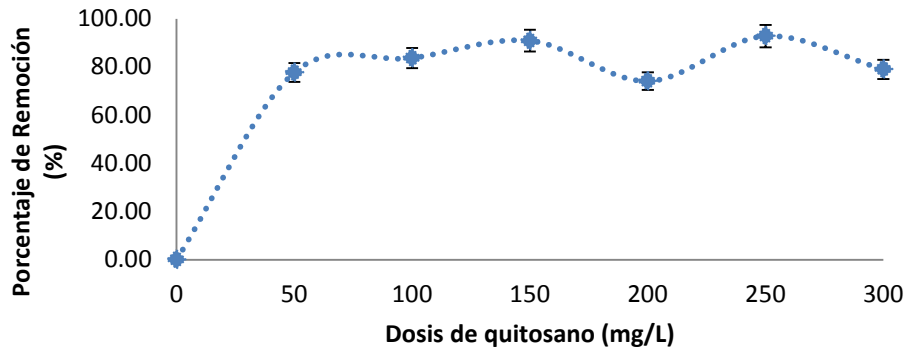


Figura 6.23 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de quitosano.

Como se puede observar en las figuras 6.22 y 6.23 el comportamiento de la turbidez residual respecto a la dosis de quitosano empleado muestra un comportamiento distinto al observado con los coagulantes anteriores. Se observa que se alcanza un porcentaje de remoción elevado (90.88%) con una dosis de 150 mg/L, sin embargo, al incrementar la dosis, el porcentaje de remoción disminuye y posteriormente vuelve a aumentar (dosis de 300 mg/L). Lo anterior se puede explicar con el mecanismo de coagulación del quitosano, al usar una cantidad de 250 mg/L, se polariza la carga superficial de las partículas coloidales haciendo que éstas se resuspendan y no puedan interactuar con las otras partículas.

6.5.1.4 Comparación del rendimiento de coagulantes con dosis 0-300 mg/L

En este apartado se comparan los resultados obtenidos con los diferentes coagulantes estudiados en los intervalos de dosis de 0-300 mg/L.

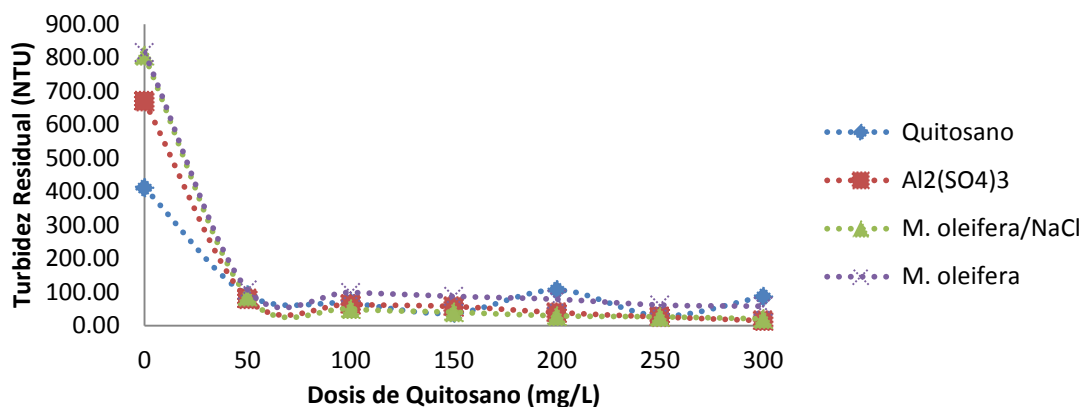


Figura 6.24 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

En la figura 6.24 se puede observar la comparación de los resultados obtenidos con los coagulantes estudiados, se puede apreciar un comportamiento similar entre los

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

coagulantes de semillas de moringa y el sulfato de aluminio, mientras que el quitosano muestra un comportamiento diferente.

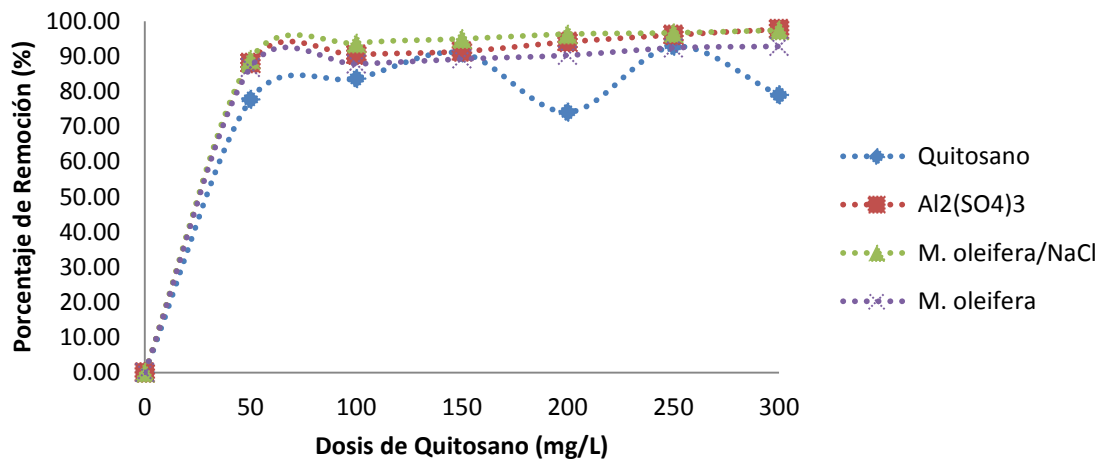


Figura 6.25 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

En la figura 6.25 se observa la comparación de las eficiencias de remoción de los coagulantes estudiados. Como se puede ver en la figura, el rendimiento del coagulante extraído de las semillas de moringa con el tratamiento con NaCl supera al del sulfato de aluminio, mientras que la eficiencia de remoción del coagulante de semillas de moringa es ligeramente inferior a la del sulfato de aluminio. Por otra parte, el quitosano logra alcanzar una eficiencia comparable a la de los otros coagulantes con una dosis de 150 mg/L.

6.5.2 Pruebas con dosis de 0-100 mg/L

6.5.2.1 Sulfato de aluminio

En la siguiente tabla (6.14) se muestran los resultados obtenidos con las pruebas de jarras usando dosis de sulfato de aluminio de 0 a 100 mg/L.

Tabla 6.14 Resultados de la prueba de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 0-100).

DOSIS No.	0	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	100 mg/L
1 - Turbidez	674.00	108.00	93.67	83.67	70.00	52.00
2 - Turbidez	669.33	110.33	96.00	83.33	68.67	51.33
3 - Turbidez	667.00	110.67	98.67	82.67	68.00	52.67
Turbidez Residual Prom.	670.11	109.67	96.11	83.22	68.89	52.00
% Remoción	0.00	83.63	85.66	87.58	89.72	92.24

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Como se puede observar en la tabla 6.14, se alcanza el mayor porcentaje de remoción con una dosis de 100 mg/L, siendo este de 92.24%.

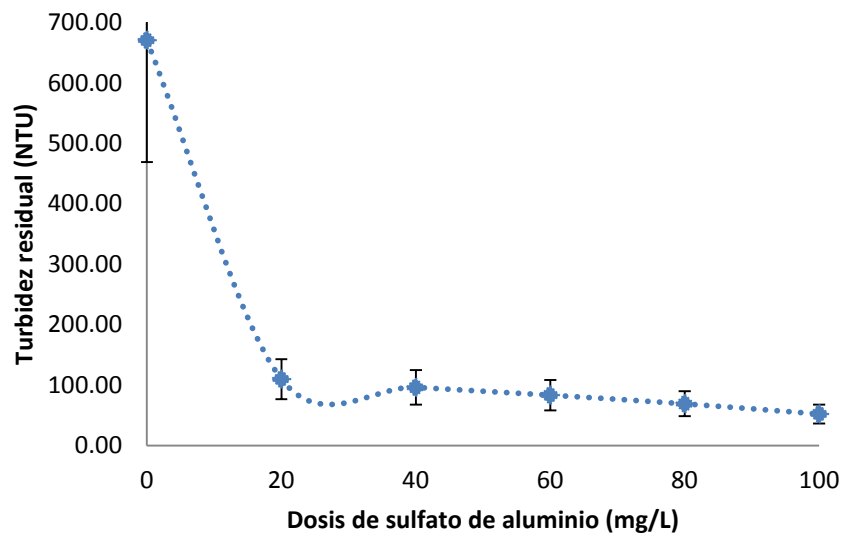


Figura 6.26 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

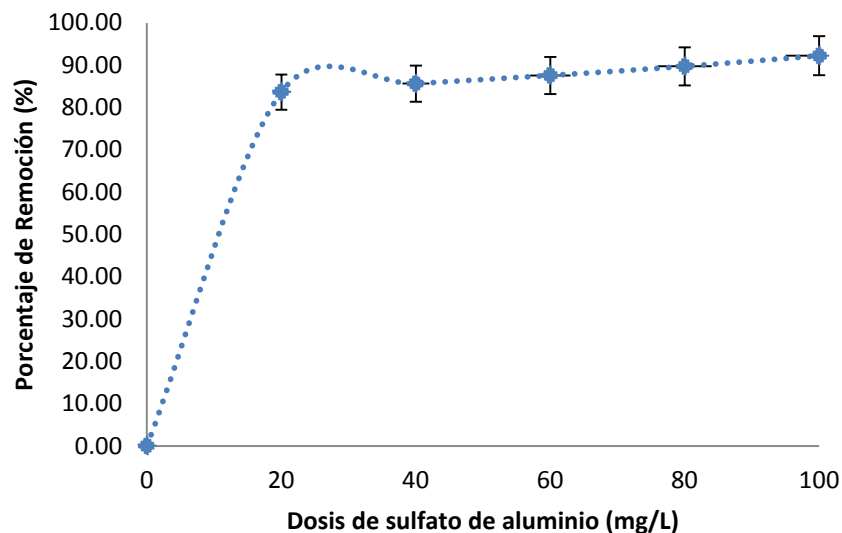


Figura 6.27 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

En las figuras 6.26 y 6.27 se puede observar la relación directamente proporcional entre la dosis de coagulante y la turbidez residual del agua. Desde la dosis inicial de 20 mg/L se logró reducir la turbidez inicial en un 83.63%, y con dosis mayores el incremento en el porcentaje de remoción fue menor, alcanzando un punto máximo con la dosis de 100 mg/L.

6.5.2.2 *Moringa oleífera*

En la tabla 6.15 se muestran los resultados obtenidos con el coagulante extraído de semillas de *Moringa oleífera*, debido a los resultados de las pruebas de jarras con la dosis de 0 a 300 mg/L, se optó por continuar con las pruebas sólo con la extracción simple de este coagulante, es decir, sólo con la extracción con agua desionizada.

Tabla 6.15 Resultados de las pruebas de jarras con coagulante de moringa, con extracción simple.

DOSIS No.	0	20	40	60	80	100
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1 - Turbidez	397.33	120.67	121.67	105.67	117.00	118.00
2 - Turbidez	395.67	130.67	119.33	107.00	118.00	116.67
3 - Turbidez	401.00	134.67	118.33	98.67	113.00	121.00
Turbidez Residual Prom.	398.00	128.67	119.78	103.78	116.00	118.56
% Remoción	0.00	67.67	69.90	73.92	70.85	70.21

Como se muestra en la tabla 6.15, el rendimiento del coagulante extraído de las semillas de moringa mostró un porcentaje de remoción mayor con la dosis de 60 mg/L, siendo de 73.92%.

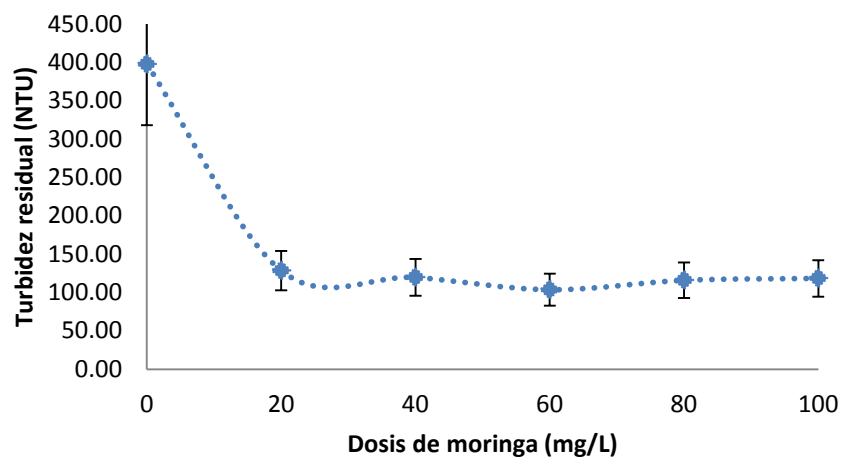


Figura 6.28 Turbidez residual vs dosis de moringa.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

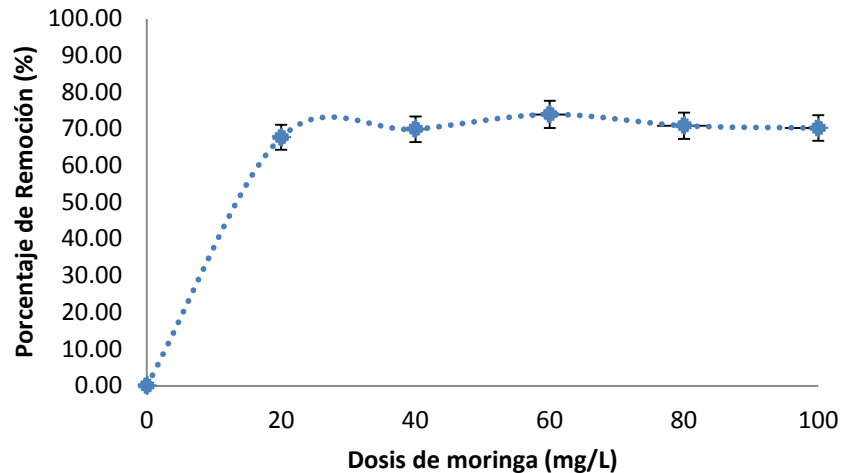


Figura 6.29 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de moringa.

De acuerdo a lo mostrado en las figuras 6.28 y 6.29, el comportamiento del porcentaje de remoción varía de forma no lineal respecto a la dosis de coagulante empleada, con un punto máximo de rendimiento con la dosis de 60 mg/L. Sin embargo, éste es menor al mostrado por el sulfato de aluminio, con un rendimiento superior al 80% con dosis desde los 20 mg/L.

6.5.2.3 Quitosano

La tabla 6.16 muestra los resultados con el coagulante quitosano, con las dosis trabajadas en este apartado de 0 a 100 mg/L.

Tabla 6.16 Resultados de las pruebas de jarras con quitosano.

DOSIS No.	0	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	100 mg/L
1 - Turbidez	411.00	120.67	101.33	87.00	80.33	64.00
2 - Turbidez	414.00	120.33	103.67	86.33	78.67	63.33
3 - Turbidez	410.33	120.67	100.67	86.00	82.00	61.67
Turbidez Residual Prom.	411.78	120.56	101.89	86.44	80.33	63.00
% Remoción	0.00	70.72	75.26	79.01	80.49	84.70

Los resultados de las pruebas con este coagulante, mostrados en la tabla anterior, indican un mayor rendimiento del quitosano comparado con el mostrado con el coagulante extraído de las semillas de moringa.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

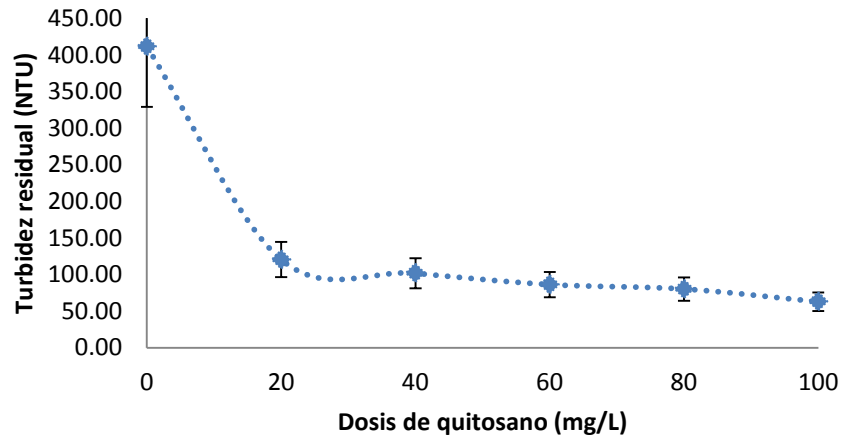


Figura 6.30 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

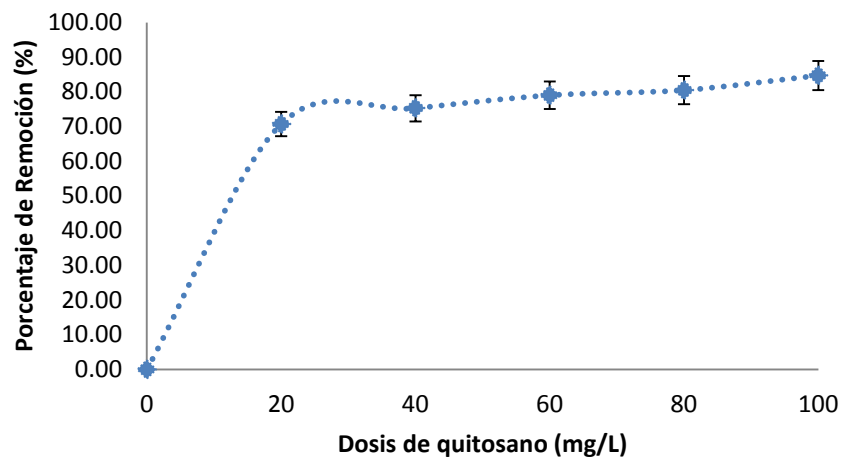


Figura 6.31 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

En las figuras 6.30 y 6.31 se muestra como el quitosano incrementa su rendimiento conforme se aumenta la dosis, alcanzando el punto máximo con la dosis de 100 mg/L con un rendimiento del 84.70%. La eficiencia de remoción de turbidez es superior a la observada con moringa, pero ligeramente menor a la obtenida con sulfato de aluminio.

6.5.2.4 Comparación del rendimiento de los coagulantes con dosis 0-100 mg/L.

En la figura 6.32 se puede observar la disminución de la turbidez que se alcanza dependiendo de la dosis de cada uno de los coagulantes que se utiliza. De acuerdo a los resultados obtenidos, el sulfato de aluminio es el que logra la menor turbidez residual, en segundo lugar el quitosano, y las semillas de moringa logran una menor reducción en comparación con los dos anteriores.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

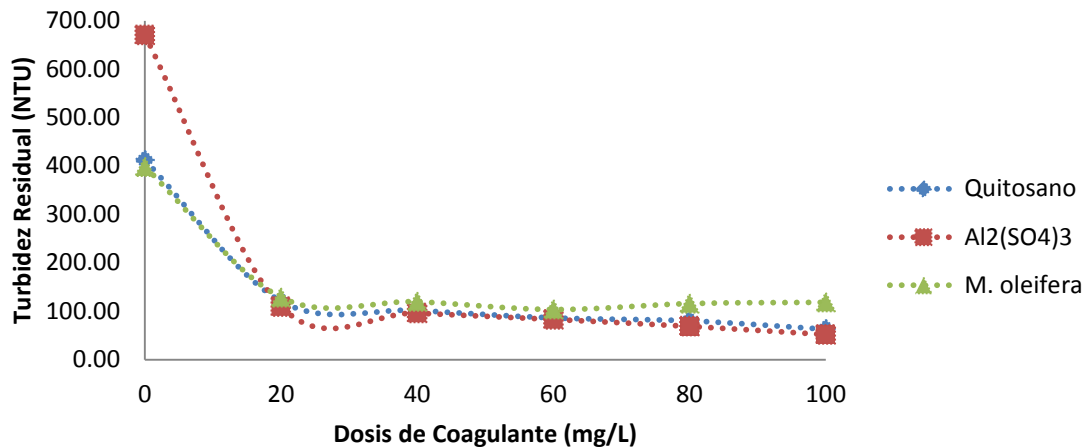


Figura 6.32 Comparación de la turbidez residual obtenida con cada uno de los coagulantes.

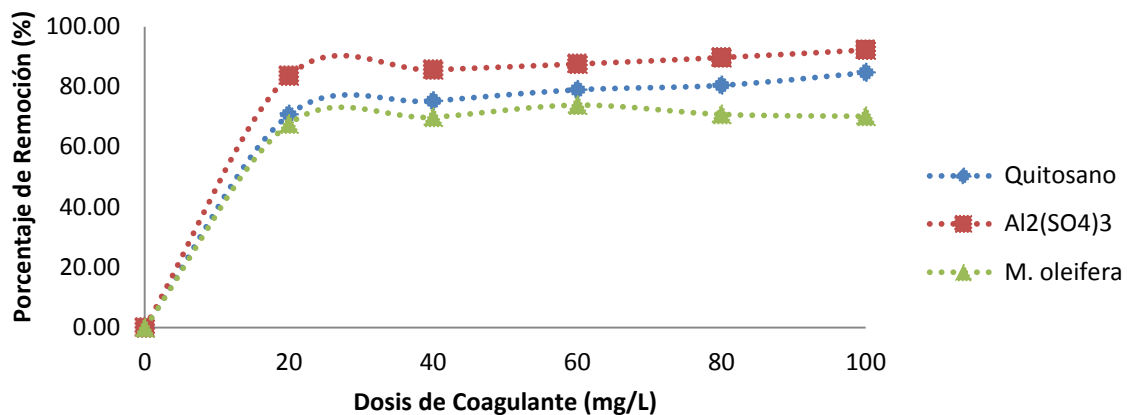


Figura 6.33 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes.

La figura 6.33 muestra el mejor rendimiento del sulfato de aluminio en comparación con el obtenido con los coagulantes naturales. Mientras que es posible obtener rendimientos superiores a 90% con dosis de 20 mg/L de sulfato de aluminio, se requieren dosis mayores a 80 mg/L de quitosano para alcanzar un rendimiento de 84%, y en el caso del coagulante obtenido de las semillas de moringa, una dosis de 60 mg/L genera una eficiencia de remoción de 75%.

6.5.2.5 Mezcla de coagulantes Moringa:Quitosano

De acuerdo a los resultados obtenidos con los coagulantes naturales con las dosis propuestas anteriormente, se procedió a evaluar la eficiencia de la mezcla de

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

coagulantes, para esto se propusieron tres combinaciones: Moringa:Qitosano 50:50, Moringa:Qitosano 75:25 y Moringa:Qitosano 25:75.

6.5.2.5.1 Moringa:Qitosano 50:50

En la tabla 6.17 se muestran los resultados de la combinación de los coagulantes naturales moringa y quitosano, con una relación 50:50 (M:Q 50:50), evaluados en un intervalo de dosis de 0-100 mg/L.

Tabla 6.17 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 50:50.

DOSIS No.	0	20	40	60	80	100
	mg/L					
1 - Turbidez	475.67	31.00	107.33	46.67	29.33	38.00
2 - Turbidez	477.00	32.67	115.67	54.67	36.33	40.67
3 - Turbidez	478.33	33.67	105.00	49.33	32.00	42.33
Turbidez Residual Prom.	477.00	32.44	109.33	50.22	32.56	40.33
% Remoción	0.00	93.20	77.08	89.47	93.18	91.55

En la tabla 6.17 se observa que se incrementa notablemente el rendimiento en comparación con el uso individual de cada uno de ellos.

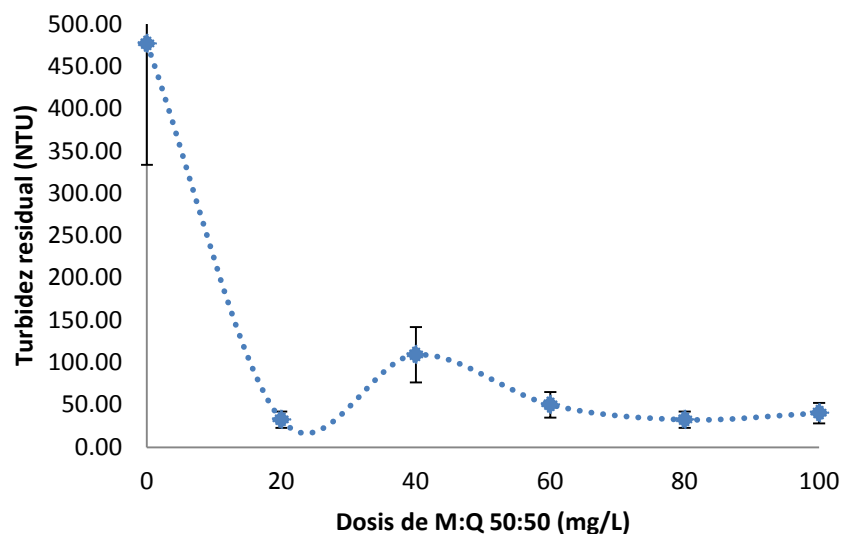


Figura 6.34 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

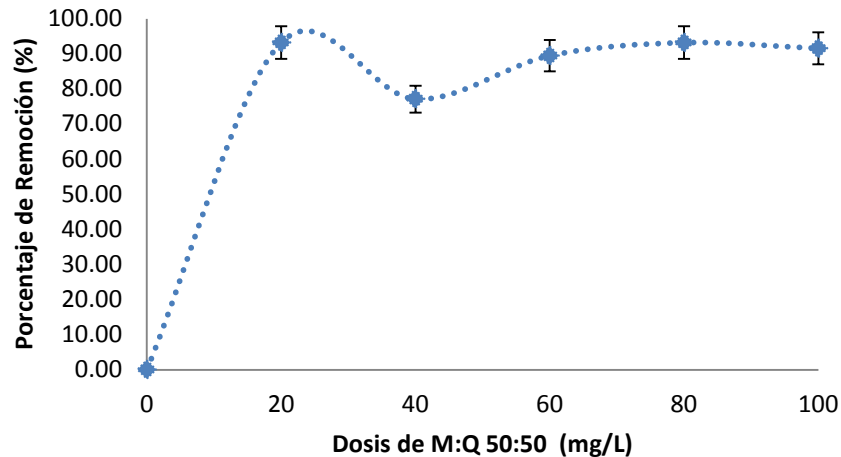


Figura 6.35 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

En las figuras 6.34 y 6.35, correspondientes a turbidez residual y porcentaje de remoción de turbidez con la mezcla de coagulantes M:Q 50:50, se puede observar un comportamiento similar al observado en los resultados con el coagulante quitosano; sin embargo, se alcanza un mayor porcentaje de remoción de turbidez con dosis menores, alcanzando un máximo de 93.20% con una dosis de 20 mg/L, con una dosis de 40 mg/L el porcentaje de remoción disminuye, volviendo a alcanzar un rendimiento superior al 90% con dosis superiores a 80 mg/L.

6.5.2.5.2 Moringa:Quitosano 75:25

En la siguiente tabla (6.18) aparecen los resultados con la mezcla de coagulantes Moringa:Quitosano con una relación 75:25 (M:Q 75:25).

Tabla 6.18 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 75:25.

DOSIS No.	0	20 mg/L	40 mg/L	60 mg/L	80 mg/L	100 mg/L
1 - Turbidez	485.67	24.00	29.67	23.67	24.00	30.33
2 - Turbidez	482.33	22.67	28.00	24.00	24.67	27.67
3 - Turbidez	469.33	21.00	34.33	25.33	25.33	31.33
Turbidez Residual Prom.	479.11	22.56	30.67	24.33	24.67	29.78
% Remoción	0.00	95.29	93.59	94.92	94.85	93.78

De acuerdo a lo resultados mostrados se la tabla anterior, se puede observar que la mezcla con 75% de moringa y 25% de quitosano permite alcanzar eficiencias de remoción

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

superiores al 95% con una dosis de 20 mg/L. Con una dosis de 40 mg/L la turbidez residual se incrementa ligeramente volviendo a reducirse a partir de dosis de 60 mg/L.

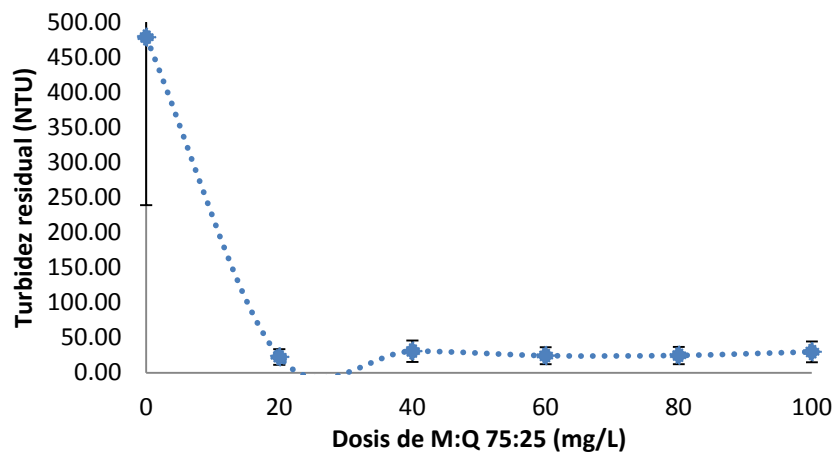


Figura 6.36 Turbidez residual vs dosis de coagulante

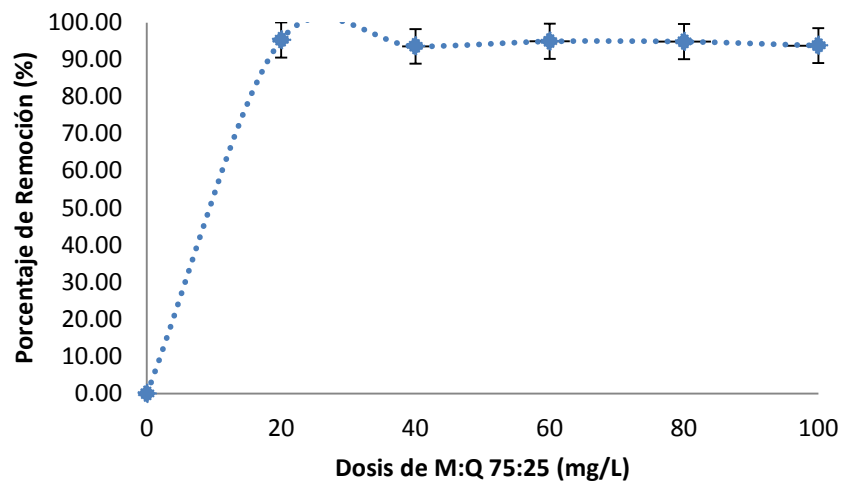


Figura 6.37 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

Como se puede observar en las figuras 6.36 y 6.37, se alcanza un mínimo en la turbidez residual, y un máximo en el porcentaje de remoción, con una dosis de 20 mg/L, alcanzando un porcentaje de remoción de turbidez superior al 95%. Al incrementar la dosis, se observa un ligero incremento en la turbidez residual, que comienza a disminuir a partir de dosis de 60 mg/L. Sin embargo, la variación de los resultados de las dosis de esta combinación (M:Q 75:25) es muy pequeña, y en todos los casos el porcentaje de remoción es superior al 90%.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

6.5.2.5.3 Moringa:Qitosano 25:75

En la tabla 6.19 se observan los resultados con la mezcla de coagulantes Moringa:Qitosano con una relación 25:75 (M:Q 25:75).

Tabla 6.19 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:qitosano, relación 25:75.

DOSIS No.	0	20	40	60	80	100
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1 - Turbidez	461.33	139.33	94.00	71.33	59.00	67.00
2 - Turbidez	461.00	148.00	95.33	75.00	64.33	70.67
3 - Turbidez	444.67	147.67	131.33	79.33	66.33	73.33
Turbidez Residual Prom.	455.67	145.00	106.89	75.22	63.22	70.33
% Remoción	0.00	68.16	76.47	83.48	86.11	84.55

Los resultados mostrados en la tabla anterior, indican que se alcanza una mayor eficiencia de remoción con una dosis de 80 mg/L para esta combinación, siendo el porcentaje de remoción de 86.11%.

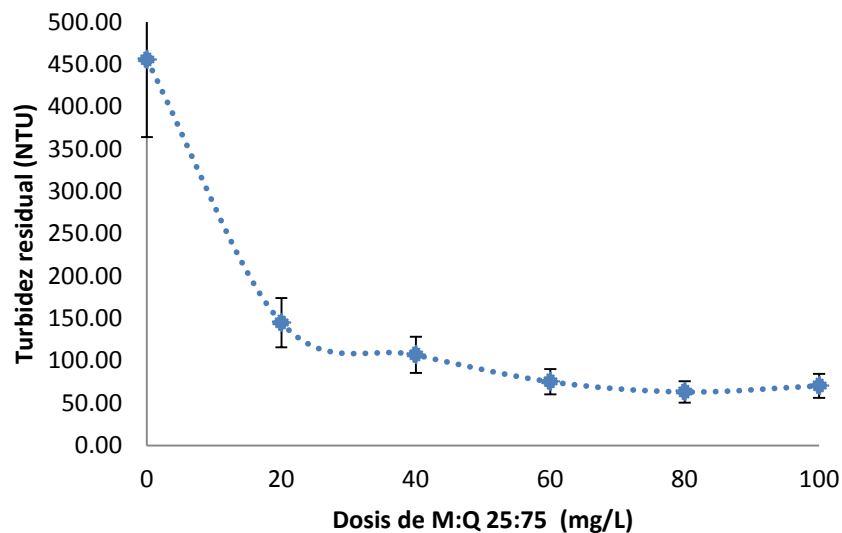


Figura 6.38 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

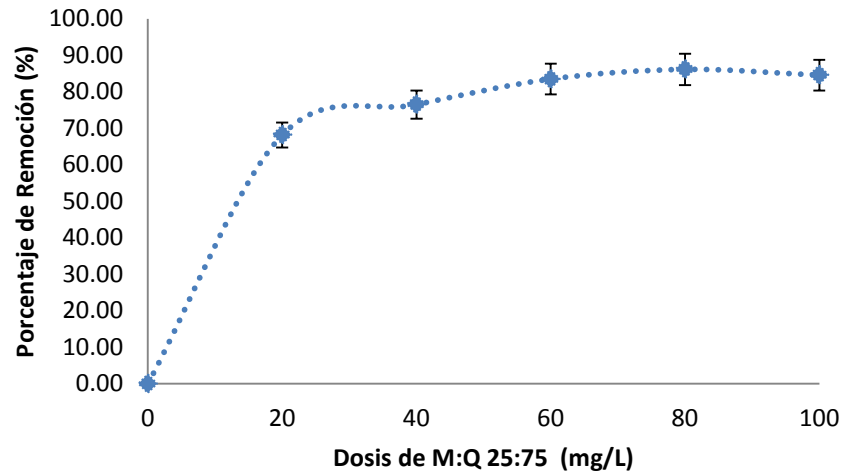


Figura 6.39 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

La figura 6.38 muestra el punto mínimo de turbidez residual, alcanzado con la dosis de 80 mg/L, y en la figura 6.39 se puede observar cómo con esta dosis se logra la mayor eficiencia de remoción de turbidez.

6.5.2.5.4 Comparación del rendimiento de las mezclas de coagulantes

Como se observa en la figura 6.40, la mezcla de coagulantes M:Q 75:25 logra la mayor reducción de la turbidez residual, seguida por la mezcla M:Q 50:50, y en tercer lugar la mezcla M:Q 25:75.

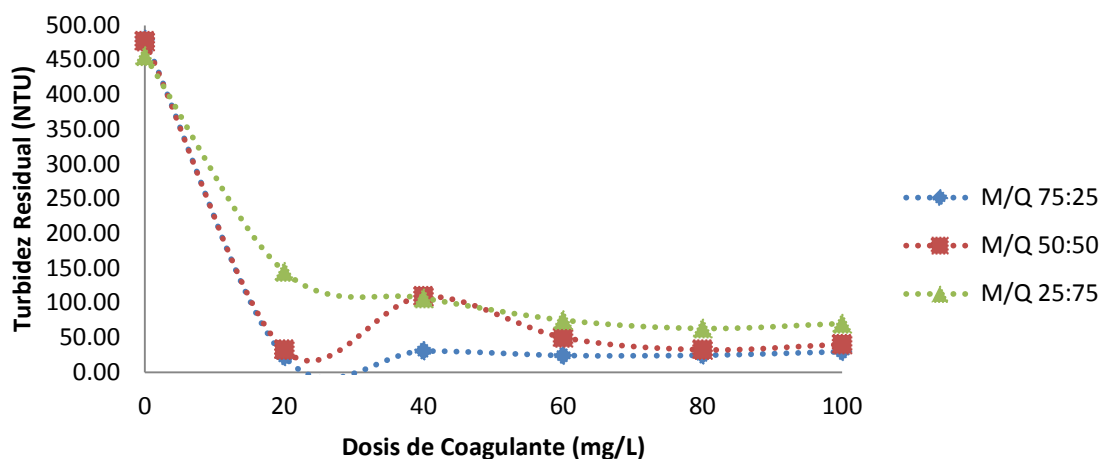


Figura 6.40 Comparación de la turbidez residual obtenida con cada uno de los coagulantes.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

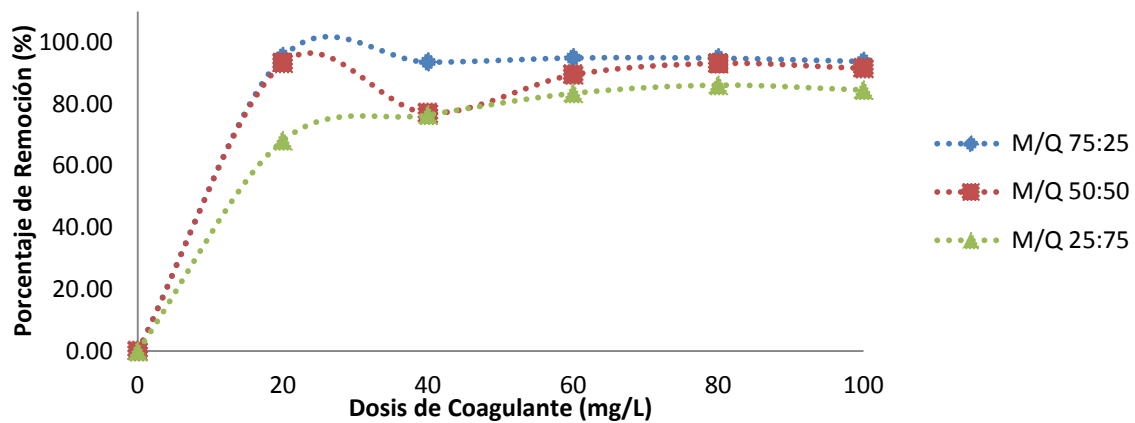


Figura 6.41 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes.

Por otro lado, como se muestra en la figura 6.41, las dos primeras mezclas después de alcanzar un máximo en el porcentaje de remoción de turbidez con dosis de 20 mg/L, con una dosis de 40 mg/L disminuyen su rendimiento. Conforme se incrementa la dosis a partir de 60 mg/L, de nuevo se incrementa la eficiencia de los coagulantes, siendo los que muestran un mayor rendimiento las mezclas que contienen moringa en mayor o igual proporción que el quitosano (M:Q 75:25 y M:Q 50:50).

6.5.2.6 Comparación del rendimiento de los coagulantes individualmente y de las mezclas

En la siguiente figura (6.42) se compara la turbidez residual de los sobrenadantes después del tratamiento con cada uno de los coagulantes así como con sus mezclas.

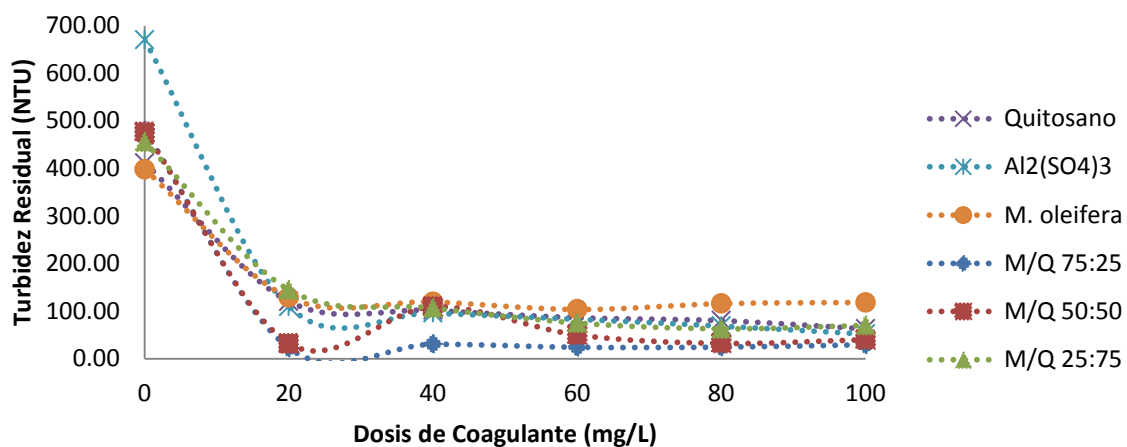


Figura 6.42 Comparación de la turbidez residual vs dosis de coagulante, para los coagulantes y sus mezclas.

En la misma figura se muestra que la mezcla de coagulantes M:Q 75:25 presenta la menor turbidez residual a lo largo de todas las pruebas con dosis de 0-100 mg/L, con un mínimo cercano a 0 con la dosis de 20 mg/L. La mezcla M:Q 50:50 muestra un comportamiento similar con una dosis de 20 mg/L, sin embargo al aumentar la dosis de este coagulante, la turbidez residual se incrementa. El coagulante que muestra la menor turbidez residual después del tratamiento es la moringa, usada individualmente. De los coagulantes individuales, el que muestra la mayor reducción en turbidez es el sulfato de aluminio.

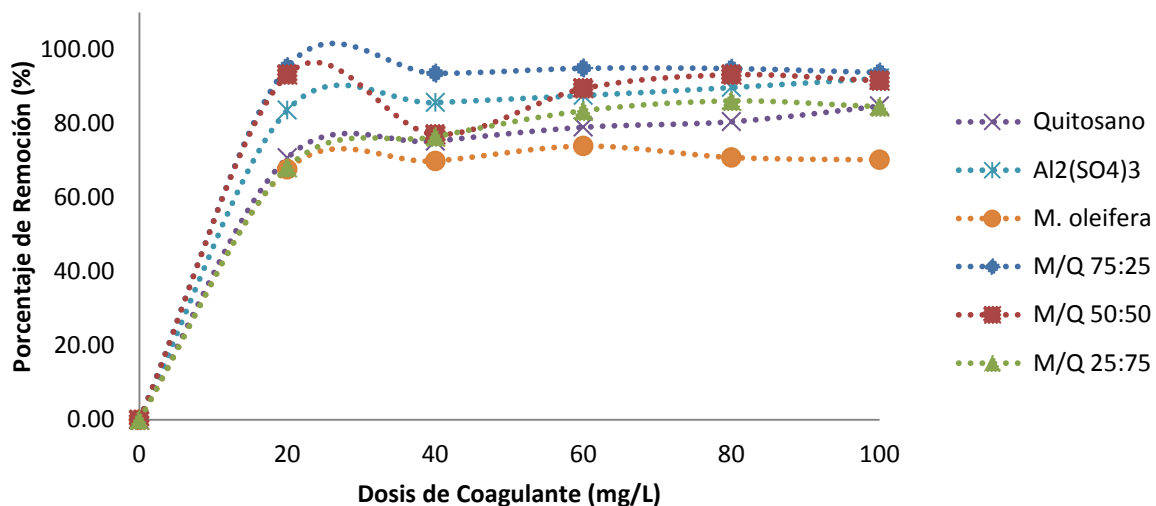


Figura 6.43 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes y sus mezclas.

La figura 6.43 compara la eficiencia de remoción de los coagulantes usados individualmente y sus mezclas, de acuerdo a lo mostrado en la figura 6.42, la moringa presenta la menor eficiencia, mientras que el sulfato de aluminio presenta el mayor rendimiento de los coagulantes usados individualmente. De acuerdo a la eficiencia de remoción, el coagulante que mostró el mejor rendimiento es la mezcla de Moringa:Qitosano 75:25, obteniendo una eficiencia superior a la del sulfato de aluminio y a la de la mezcla Moringa:Qitosano 50:50, alcanzando con una dosis de 20 mg/L un porcentaje de remoción superior al 95%.

Los resultados indican que la combinación de los coagulantes naturales, usados en la proporción correcta, incrementa su eficiencia de remoción de turbidez, y es superior a la del coagulante usado como referencia (sulfato de aluminio). La ventaja del uso del qitosano es que en su estructura (Fig. 4.8) contiene seis grupos OH por cada monómero,

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

donde se puede presentar intercambio protónico (por ejemplo con acuaiones metálicos); y por otro lado puede haber acomplejamiento por el nitrógeno aminado de su estructura, actuando como adsorbente.

6.5.3 Pruebas con dosis de 100-200 mg/L

6.5.3.1 Sulfato de aluminio

Derivado de los resultados obtenidos en las series de pruebas anteriores, se realizó una prueba con sulfato de aluminio con dosis desde 100 hasta 200 mg/L, para observar el comportamiento este coagulante. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.20.

Tabla 6.20 Resultados de las pruebas de jarras con sulfato de aluminio con dosis de 100-200 mg/L.

DOSIS No.	0	100 mg/L	120 mg/L	140 mg/L	160 mg/L	180 mg/L	200 mg/L
1 - Turbidez	674.00	51.00	85.67	91.67	62.00	69.33	53.67
2 - Turbidez	669.33	47.67	80.00	93.00	64.67	71.67	54.33
3 - Turbidez	667.00	52.33	70.67	90.67	64.00	71.33	50.00
Turbidez Residual Prom.	670.11	50.33	78.78	91.78	63.56	70.78	52.67
% Remoción	0.00	92.49	88.25	86.30	90.51	89.44	92.14

Como se puede observar en los resultados mostrados, con una dosis de 100 mg/L se alcanza un porcentaje de remoción de 92.49%.

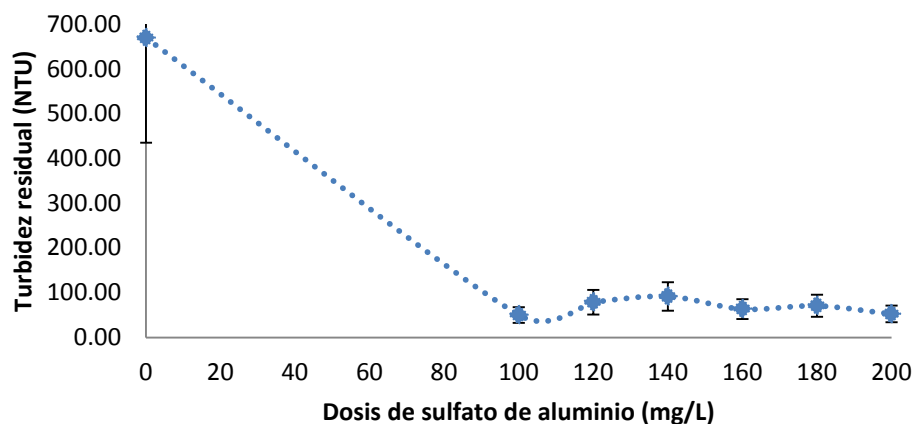


Figura 6.44 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

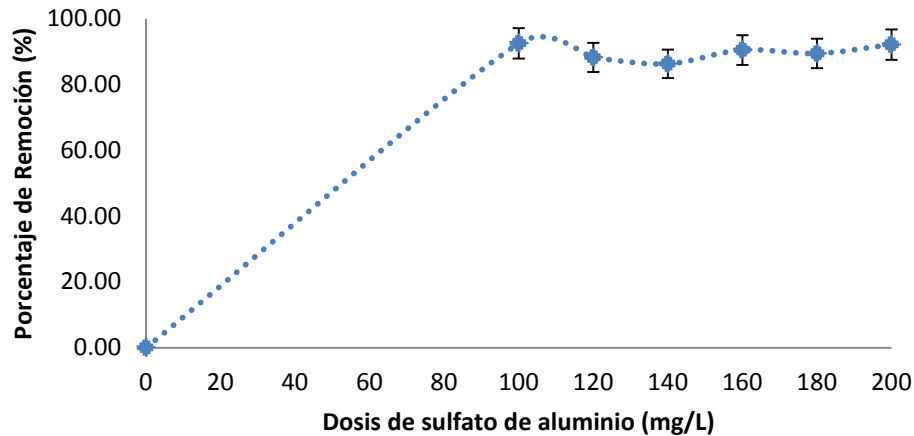


Figura 6.45 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

Como se puede observar en las figuras 6.44 y 6.45, el valor de turbidez más bajo así como el mayor porcentaje de remoción de turbidez se lograron con una dosis de 100 mg/L. Este resultado, si se compara con los obtenidos con las pruebas de jarras con dosis de 0-100 mg/L, es similar al obtenido la misma dosis.

6.5.3.2 *Moringa oleífera*

Con el objetivo de continuar observando el comportamiento del coagulante obtenido de las semillas de moringa, se realizaron pruebas con dosis desde 100 hasta 200 mg/L. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.21.

Tabla 6.21 Resultados de las pruebas de jarras con coagulante de moringa con dosis de 100-200 mg/L.

DOSIS No.	0	100 mg/L	120 mg/L	140 mg/L	160 mg/L	180 mg/L	200 mg/L
1 - Turbidez	420.67	116.00	108.00	104.33	87.33	84.33	63.33
2 - Turbidez	418.33	116.00	112.00	104.00	91.00	81.67	59.67
3 - Turbidez	420.00	118.00	109.00	101.33	89.00	81.33	65.67
Turbidez Residual Prom.	419.67	116.67	109.67	103.22	89.11	82.44	62.89
% Remoción	0.00	72.20	73.87	75.40	78.77	80.36	85.02

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

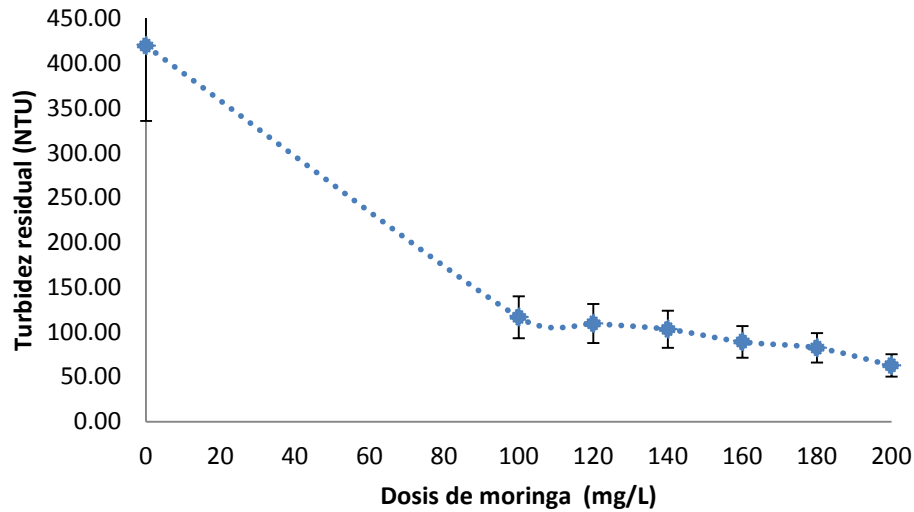


Figura 6.46 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

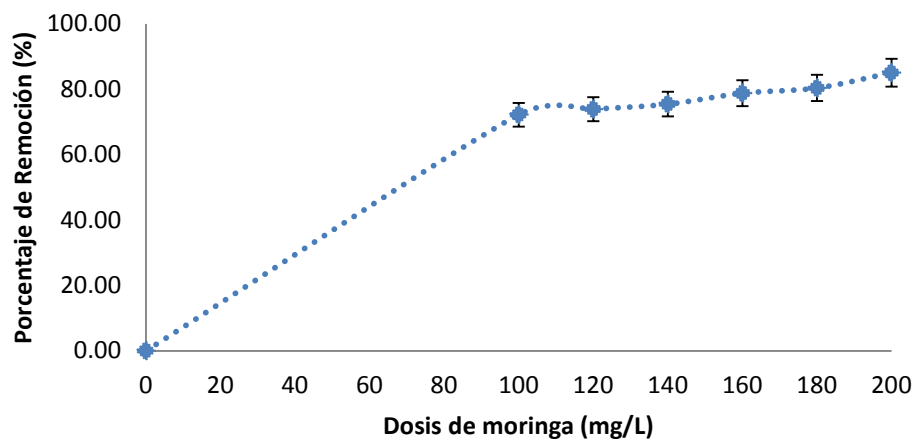


Figura 6.47 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

Como se muestra en la figura 6.46, la turbidez residual continúa disminuyendo conforme se incrementa la dosis de coagulante, alcanzando un valor mínimo con la dosis de 200 mg/L, reduciéndola de 419.67 a 62.89. La figura 6.47 muestra la eficiencia de remoción de este coagulante, que en el caso de la dosis de 200 mg/L alcanza un porcentaje de remoción de 85.02%. Comparando estos resultados con los obtenidos en las pruebas con dosis de 0-100 mg/L, se observa una mayor eficiencia en la remoción de este coagulante al utilizar dosis mayores.

6.5.3.3 Quitosano

Al igual que con los coagulantes anteriores, se realizaron pruebas con el mismo intervalo de dosis a fin de observar el comportamiento del quitosano. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.22.

Tabla 6.22 Resultados de las pruebas de jarras con coagulante de moringa con dosis de 100-200 mg/L.

DOSIS No.	0	100 mg/L	120 mg/L	140 mg/L	160 mg/L	180 mg/L	200 mg/L
1 - Turbidez	411.00	58.67	46.67	42.67	26.33	20.00	23.67
2 - Turbidez	412.67	58.00	45.67	42.33	25.67	19.00	26.33
3 - Turbidez	411.33	59.67	46.67	42.67	23.67	21.33	25.67
Turbidez Residual Prom.	411.67	58.78	46.33	42.56	25.22	20.11	25.22
% Remoción	0.00	85.72	88.74	89.66	93.87	95.11	93.87

Los resultados anteriores muestran como el quitosano alcanza la mayor reducción de turbidez con una dosis de 180 mg/L, siendo su eficiencia de remoción de 95.11%.

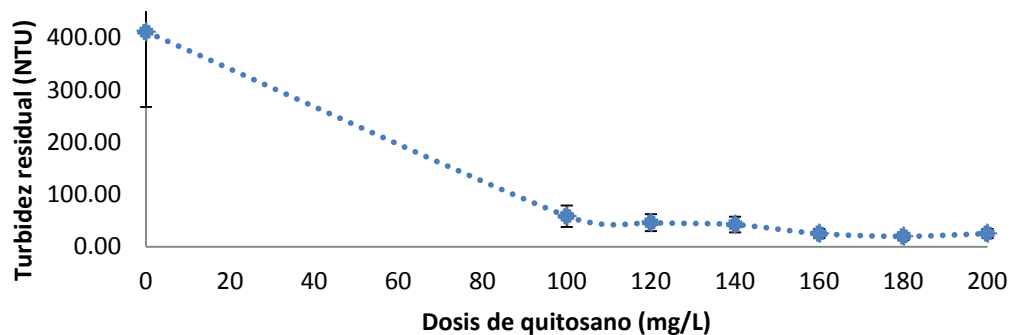


Figura 6.48 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

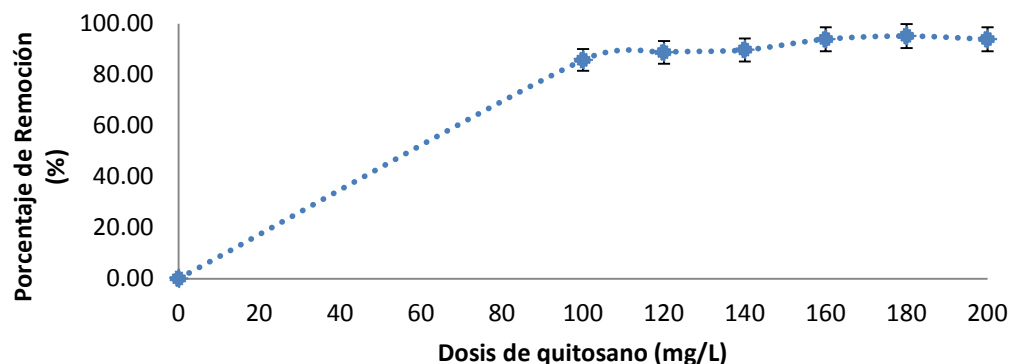


Figura 6.49 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Las figuras 6.48 y 6.49 muestran la turbidez residual comparada con la dosis de coagulante, y el porcentaje de remoción alcanzado con determinada dosis. Como puede observarse en ambas figuras, la turbidez residual y el porcentaje de remoción no presentan un incremento notable con dosis de 100-140 mg/L, pero al incrementar la dosis hasta 180 mg/L, el quitosano alcanza una eficiencia del 95.11%. Comparando estos resultados con los obtenidos en las pruebas con dosis de 0-100 mg/L, se puede observar el incremento en la eficiencia de remoción del coagulante.

6.5.3.4 Comparación del rendimiento de los coagulantes con dosis 100-200 mg/L.

En la figura 6.50 se muestra la comparación del desempeño de los coagulantes estudiados, de acuerdo a los resultados obtenidos, el quitosano es el que logra la menor turbidez residual, seguido por el sulfato de aluminio; mientras que las semillas de moringa logran un rendimiento ligeramente inferior.

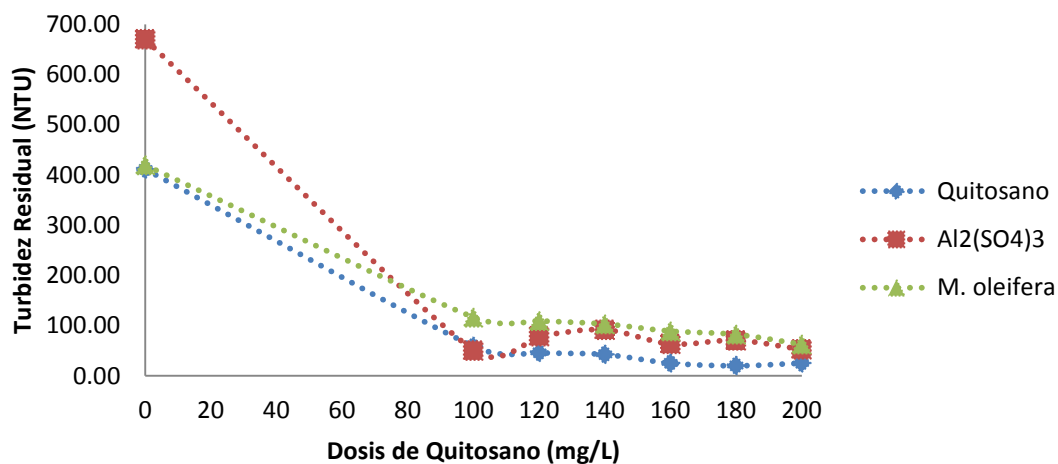


Figura 6.50 Comparación de la turbidez residual obtenida con cada uno de los coagulantes.

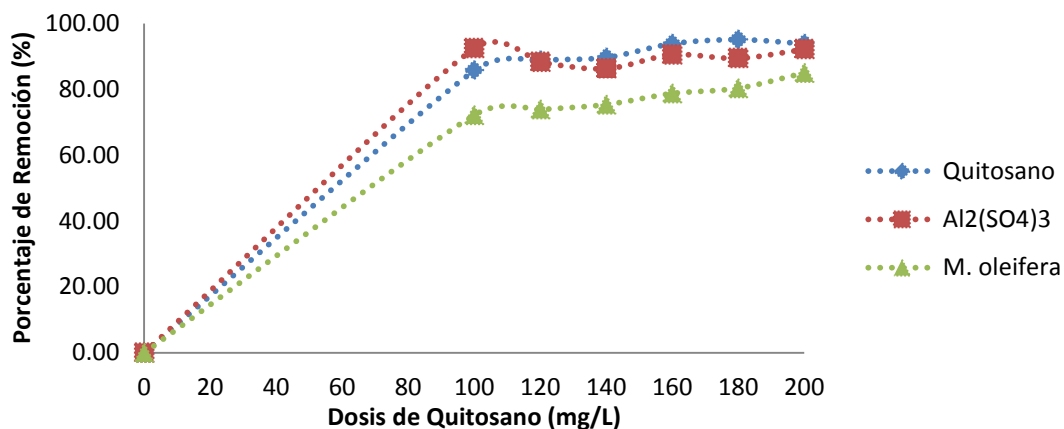


Figura 6.51 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

La figura 6.51 compara la eficiencia de remoción de los coagulantes, mostrando un mayor porcentaje de remoción de sulfato de aluminio (92.49%) con la menor dosis de esta prueba, mientras que el quitosano incrementa su eficiencia conforme se aumenta la dosis de coagulante, alcanzando un 95% de remoción. Por otro lado, el coagulante de semillas de moringa, al igual que el quitosano, incrementan su eficiencia conforme se eleva la dosis, sin embargo el porcentaje de remoción que alcanza (85.02%) es menor al obtenido por los otros coagulantes.

6.5.3.5 Mezcla de Coagulantes Moringa:Quitosano

De igual forma que con las pruebas anteriores, se procedió a evaluar el rendimiento de la mezcla de los coagulantes naturales, con las tres combinaciones ya utilizadas en la prueba con dosis de 0-100 mg/L.: Moringa:Quitosano 50:50, Moringa:Quitosano 75:25 y Moringa:Quitosano 25:75.

6.5.3.5.1 Moringa:Quitosano 50:50

En la siguiente tabla (6.23) se muestran los resultados de las pruebas de jarras usando la combinación de coagulantes Moringa:Quitosano en una relación 50:50. Las dosis utilizadas fueron de 100-200 mg/L.

Tabla 6.23 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 50:50.

DOSIS No.	0 mg/L	100 mg/L	120 mg/L	140 mg/L	160 mg/L	180 mg/L	200 mg/L
1 - Turbidez	477.00	34.33	85.00	44.33	32.00	37.33	41.67
2 - Turbidez	477.00	32.67	115.67	54.67	36.33	40.67	41.67
3 - Turbidez	478.33	33.67	105.00	49.33	32.00	42.33	47.67
Turbidez Residual Prom.	477.44	33.56	101.89	49.44	33.44	40.11	43.67
% Remoción	0.00	92.97	78.66	89.64	92.99	91.60	90.85

Como se muestra en la tabla anterior, los mejores resultados se obtuvieron con la menor dosis empleada en esta prueba. Las figuras 6.52 y 6.53 muestran la comparación de la turbidez residual contra la dosis de coagulante y la eficiencia de remoción que se alcanzó con las diferentes dosis de coagulantes.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

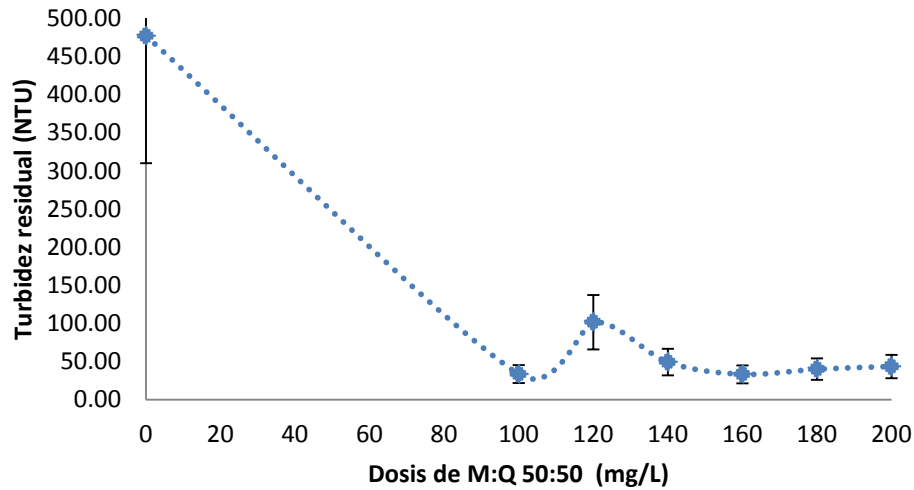


Figura 6.52 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

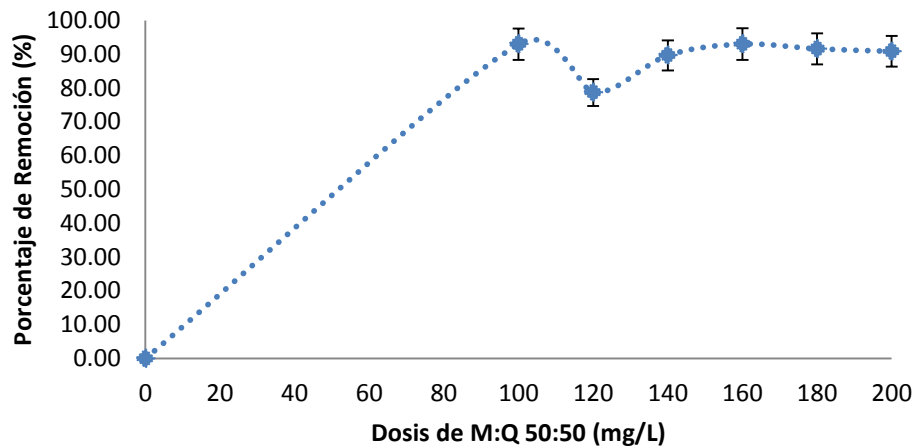


Figura 6.53 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

En la figura 6.52 se muestra claramente que con la menor dosis se alcanza una mayor reducción de la turbidez, lo mismo se ve reflejado en la figura 6.53 ya que la mayor eficiencia de remoción se alcanzó con la dosis de 100 mg/L, 92.97%. Al comparar estos resultados con los obtenidos con la prueba con dosis de 0-100 mg/L, se observa que la eficiencia fue mayor con una menor dosis de coagulante, ya que con una dosis de 20 mg/L de la mezcla de los coagulantes se obtuvo un rendimiento superior al 93%.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

6.5.3.5.2 Moringa:Quitosano 75:25

La tabla 6.24 muestra los resultados de la combinación de los coagulantes naturales moringa y quitosano, con una relación 75:25 (M:Q 75:25).

Tabla 6.24 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 75:25.

DOSIS No.	0 mg/L	100 mg/L	120 mg/L	140 mg/L	160 mg/L	180 mg/L	200 mg/L
1 - Turbidez	478.67	28.00	23.67	29.00	31.00	33.00	29.67
2 - Turbidez	438.33	27.00	23.67	29.67	32.67	34.67	32.00
3 - Turbidez	434.00	21.00	34.33	25.33	25.33	31.33	39.00
Turbidez Residual Prom.	450.33	25.33	27.22	28.00	29.67	33.00	33.56
% Remoción	0.00	94.38	93.92	93.78	93.41	92.66	92.51

Como se muestra en la tabla anterior, el mejor resultado de esta prueba se obtuvo con la menor dosis empleada, alcanzando una eficiencia de remoción del 94.38%.

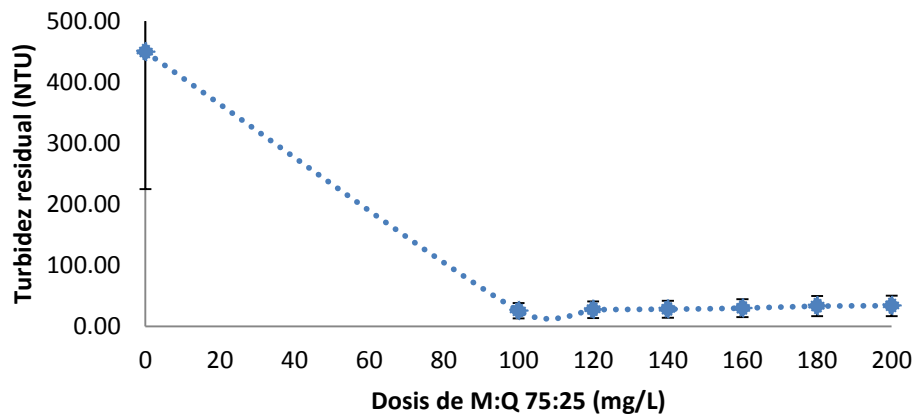


Figura 6.54 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

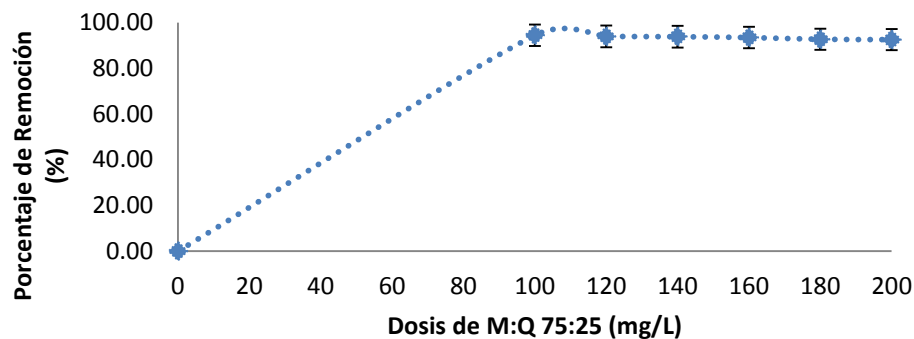


Figura 6.55 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Como se muestra en la figura 6.54, la mayor reducción de turbidez se obtuvo con la dosis de 100 mg/L, reduciéndola desde 450.33 NTU hasta 25.33 NTU, como se aprecia en la figura 6.55, la eficiencia de este coagulante fue muy alta, alcanzando el 94.38%. Sin embargo, al comparar con los resultados obtenidos en las pruebas con menores dosis (0-100 mg/L), una dosis de 20 mg/L de este coagulante presentó una mayor eficiencia de remoción, superior al 95% (ver figura 6.37).

6.5.3.5.3 Moringa:Qitosano 25:75

Como parte de la metodología, también se realizaron pruebas con la combinación de coagulantes compuesta en su mayoría por quitosano (M:Q 25:75). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.25. Como se observa en la tabla, la mayor reducción de la turbidez se alcanzó con la dosis de 200 mg/L.

Tabla 6.25 Resultados de las pruebas de jarras con la mezcla de coagulantes moringa:quitosano, relación 25:75.

DOSIS No.	0 mg/L	100 mg/L	120 mg/L	140 mg/L	160 mg/L	180 mg/L	200 mg/L
1 - Turbidez	456.00	66.33	61.00	48.67	36.00	33.00	27.67
2 - Turbidez	462.33	68.67	56.33	51.33	41.67	35.67	27.33
3 - Turbidez	444.67	65.33	61.00	52.33	44.67	36.67	29.33
Turbidez Residual Prom.	454.33	66.78	59.44	50.78	40.78	35.11	28.11
% Remoción	0.00	85.30	86.91	88.82	91.02	92.27	93.81

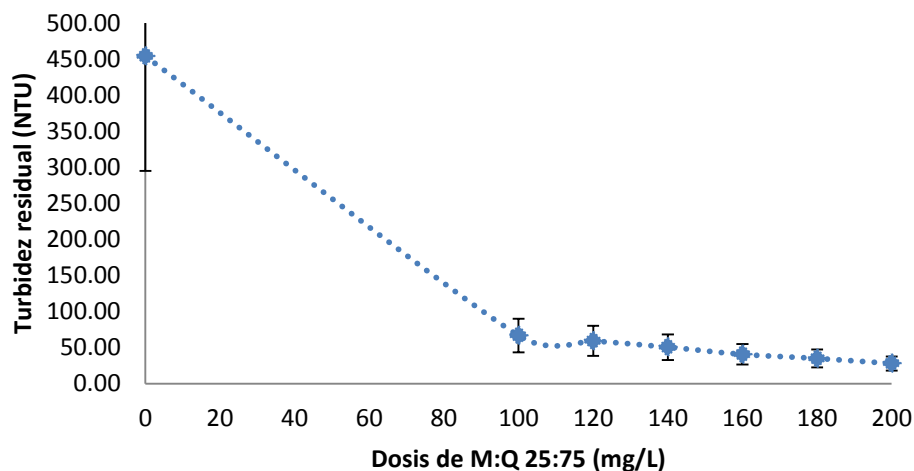


Figura 6.56 Turbidez residual vs dosis de coagulante.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

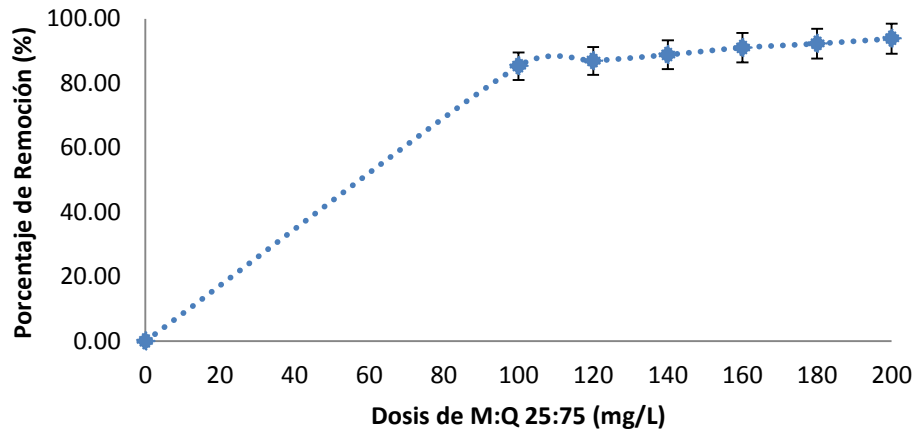


Figura 6.57 Porcentaje de remoción de turbidez vs dosis de coagulante.

Las figura 6.56 muestra una tendencia lineal donde al incrementar la dosis de coagulante se reduce la turbidez residual, mientras que la figura 6.57 fija el punto de máximo porcentaje de remoción de turbidez en la dosis de 200 mg/L, alcanzando el 93.81%.

6.5.3.5.4 Comparación del rendimiento de las mezclas de coagulantes

La figura 6.58 muestra la comparación del rendimiento de las mezclas de coagulantes utilizadas, como se puede ver, la que alcanza la mayor disminución de la turbidez residual es la mezcla Moringa:Quitosano 75:25, alcanzando un mínimo con la dosis de 100 mg/L. Por otro lado, la mezcla con relación 50:50 muestra un comportamiento similar al mostrado por el quitosano, de igual manera, alcanza la mayor reducción de turbidez con una dosis de 100 mg/L. La mezcla que contenía en su mayor parte quitosano fue la que mostró la menor reducción en cuanto a reducción de turbidez.

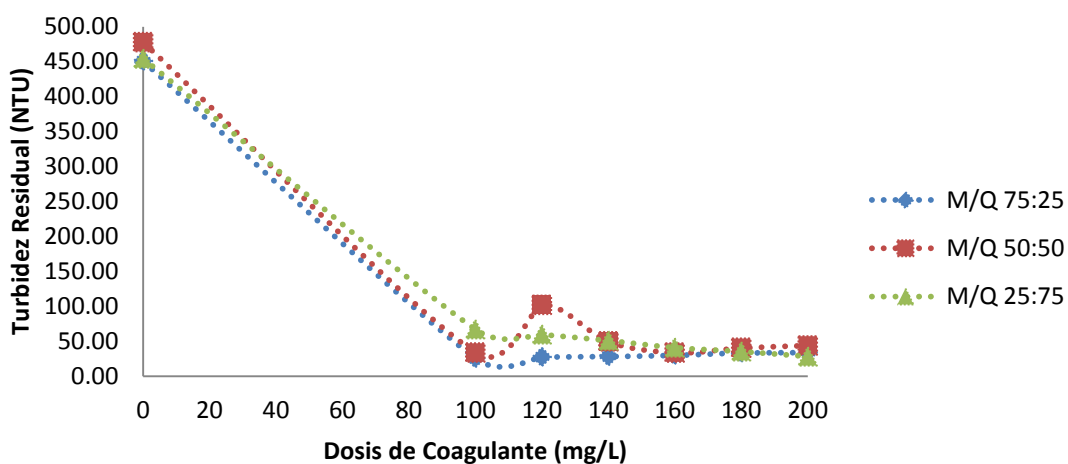


Figura 6.58 Comparación de Turbidez residual vs dosis de cada coagulante.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

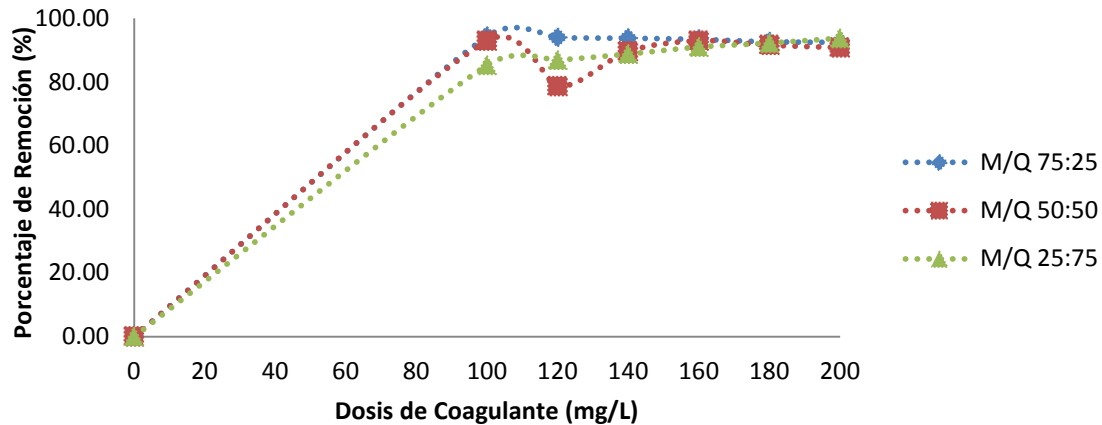


Figura 6.59 Comparación del porcentaje de remoción de vs dosis de coagulante.

Como se puede observar en la figura 6.59, la relación de mezcla de coagulantes que tuvo la mayor eficiencia de remoción fue 75:25, alcanzando 94.38% con una dosis de 100 mg/L. La mezcla con relación 50:50 alcanzó una remoción de 92.99%, con una dosis de 160 mg/L. En el caso de la mezcla con relación 25:75, se alcanzó un 93.81% con una dosis de 200 mg/L. Tomando en cuenta tanto el rendimiento como la dosis ocupada, los mejores resultados se obtuvieron con la mezcla de coagulantes compuesta principalmente por moringa oleífera (M:Q 75:25).

6.5.3.6 Comparación del rendimiento de los coagulantes individualmente y sus mezclas

La figura 6.60 muestra la comparación entre los diferentes coagulantes utilizados así como de las mezclas de éstos.

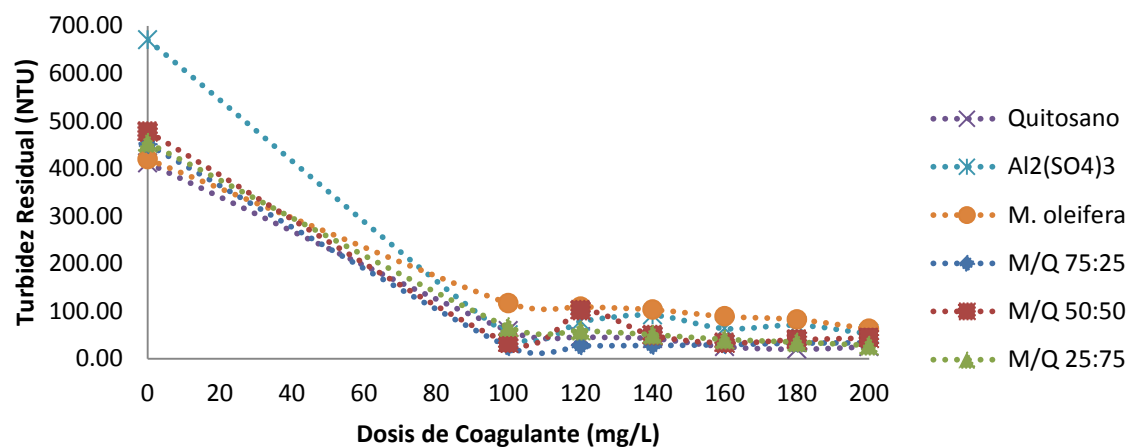


Figura 6.60 Comparación de la turbidez residual vs dosis de coagulante, para los coagulantes y sus mezclas.

Como se puede observar en la figura, de todos los coagulantes estudiados, los que alcanzaron la mayor reducción fueron las mezclas M:Q 75:25, seguido por la mezcla M:Q 50:50. Los coagulantes individuales mostraron un rendimiento menor al mostrado por las mezclas de coagulantes.

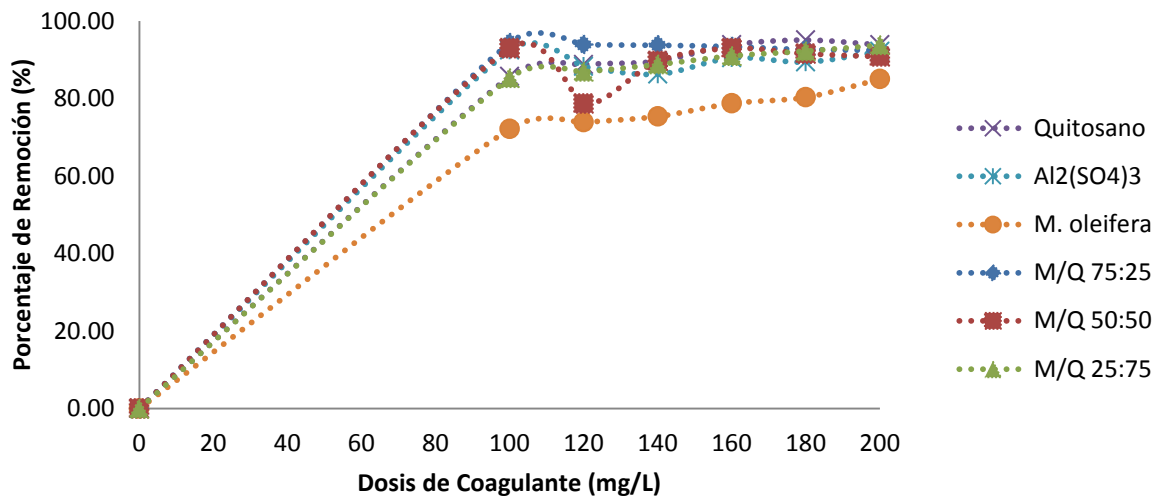


Figura 6.61 Comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes y sus mezclas.

La figura 6.61 muestra la comparación del porcentaje de remoción de los coagulantes utilizados. Se puede observar como el coagulante que tiene la mayor remoción es la mezcla M:Q 75:25, con un 94.38%, seguido por la mezcla M:Q 50:50 con un 92.97%, y el sulfato de aluminio con un 92.49%. Los coagulantes individuales quitosano y moringa, así como la mezcla M:Q con relación 25:75 mostraron una eficiencia menor. En la prueba con dosis de 0-100 mg/L, fue también la mezcla de coagulantes Moringa:Quitosano con relación 75:25 la que mostró la mayor eficiencia de remoción, ya que con una dosis de 20 mg/L se alcanzó una eficiencia del 95.29%.

6.5.4 Dosis óptimas de cada coagulante y de sus mezclas

La tabla 6.26 muestra los resultados de las pruebas anteriores, seleccionando para cada coagulante utilizado en las pruebas la dosis óptima, en función de la turbidez inicial del agua, la turbidez residual después del tratamiento y la eficiencia de remoción alcanzada con cada uno de los coagulantes utilizados y de sus mezclas.

Tabla 6.26 Resultados de las pruebas de dosis óptima con los diferentes coagulantes.

Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Turbidez inicial (NTU)	Turbidez residual (NTU)	Eficiencia de Remoción (%)
Sulfato de aluminio	100	670.11	52.00	92.49
Quitosano	180	411.67	20.11	95.11
Moringa	200	419.67	52.89	85.02
M:Q 50:50	20	477.00	32.44	93.20
M:Q 75:25	20	479.11	22.56	95.29
M:Q 25:75	200	454.33	28.11	93.81

Como se puede observar en la tabla 6.26, las dosis necesarias para obtener eficiencias de remoción elevadas con los coagulantes individuales fueron altas, en este caso el sulfato de aluminio mostró alcanzar una eficiencia del 92.49% con la dosis más baja en comparación con los coagulantes naturales (100 mg/L), mientras que el quitosano requirió una dosis de 180 mg/L para poder alcanzar una eficiencia de remoción del 95.11%. El coagulante obtenido a partir de las semillas de moringa necesitó una dosis de 200 mg/L, y el rendimiento que alcanzó fue del 85.02%. En el caso de las combinaciones de los coagulantes naturales, las mezclas M:Q 50:50 y M:Q 75:25 demostraron ser las más eficientes, ambas combinaciones con una dosis óptima de 20 mg/L; la combinación M:Q 50:50, que contenía igual cantidad de moringa y quitosano, alcanzó con esta dosis una eficiencia de remoción de 93.20%, mientras que la combinación M:Q 75:25, con un mayor contenido de moringa, alcanzó la mayor eficiencia de remoción de todas pruebas con un 95.29%. Por otro lado, la combinación compuesta por quitosano en su mayor parte (M:Q 25:75), requirió una dosis muy elevada, similar a la encontrada para la moringa y el quitosano utilizados individualmente, alcanzando una eficiencia de remoción del 93.81%.

6.6 Determinación de condiciones de mezcla rápida y lenta

Una vez obtenidas las dosis óptimas para cada coagulante, se realizaron pruebas con las velocidades y tiempos, tanto de mezcla rápida como de mezcla lenta, comenzando por los valores mencionados en la tabla 5.4, El criterio utilizado fue la rapidez con que aparecieron los flocs, y el tamaño de estos, como ejemplo se muestra la figura 6.62.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

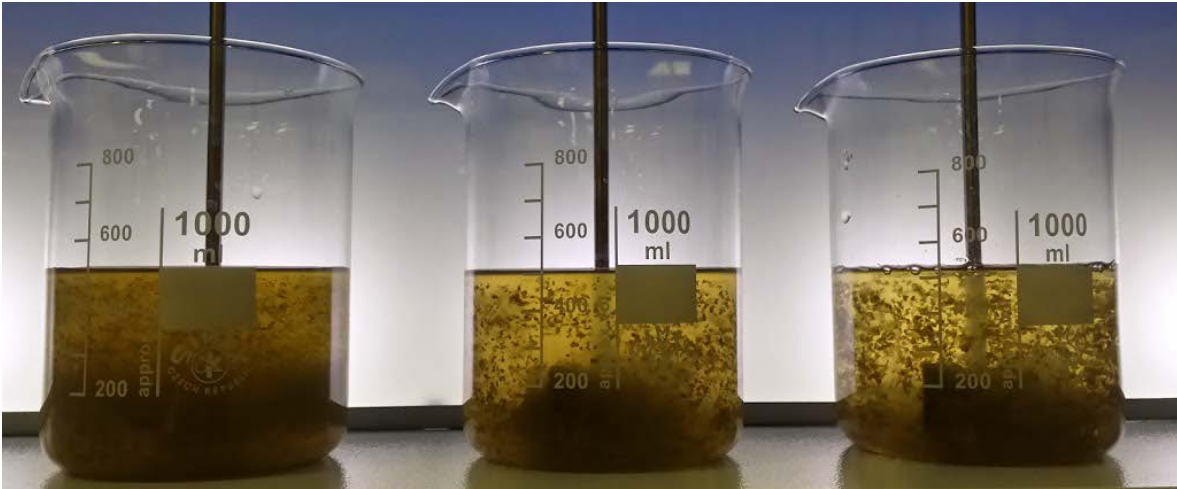


Figura 6.62 Diferencia en el tamaño de los flocs que se forman después de la fase de mezcla rápida.

En la imagen de la izquierda se probó una velocidad baja para la coagulación, se observan flocs de un tamaño muy reducido; en la segunda jarra se probó una velocidad ligeramente más alta, en ésta se aprecia la formación de flocs de un mayor tamaño. En la última jarra (derecha) se utilizó una velocidad mayor a la de las anteriores, y se observan flocs de mayor de tamaño, sin embargo, al final del periodo de sedimentación no todos sedimentaron.

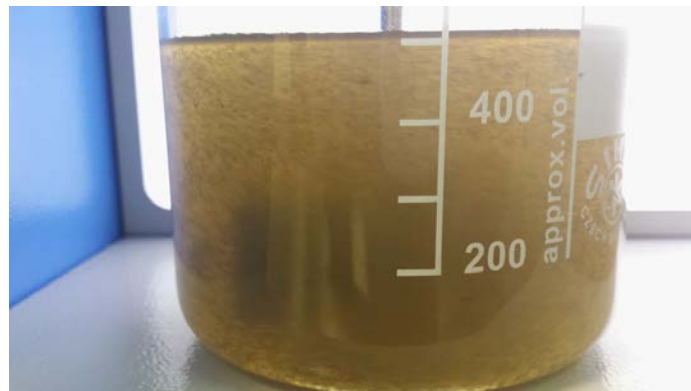


Figura 6.63 Flocs que se formaron al utilizar una velocidad baja de mezcla rápida.

La figura 6.63 muestra el pequeño tamaño de los flocs que se formaron al utilizar una velocidad baja de mezcla rápida, lo cual resultó en una pobre sedimentación del material, ya que en su mayoría, los flocs no adquirieron el tamaño suficiente para sedimentar.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Las velocidades que mostraron mejores resultados se muestran en la tabla 6.27, para cada coagulante.

Tabla 6.27 Resultados de las pruebas para velocidades y tiempos de las diferentes etapas del proceso.

PRUEBAS DE JARRAS	Sulfato Aluminio	Moringa	Quitosano
Velocidad de coagulación (rpm)	150	200	200
Tiempo de coagulación (min)	1	1	1
Velocidad de floculación (rpm)	25	25	25
Tiempo de floculación (min)	15	15	15
Tiempo de sedimentación (min)	20	20	20

6.7 Determinación del pH óptimo

Una vez determinada la dosis óptima para cada coagulante, se procedió a realizar pruebas de jarras para determinar el pH óptimo de operación para cada uno de ellos, así como de las mezclas. Para ajustar el pH del agua a tratar se utilizaron soluciones diluidas de ácido sulfúrico diluido (0.1 N) e hidróxido de sodio diluido (0.1 N).

6.7.1 Sulfato de aluminio

Como se puede observar en la tabla 6.28, así como en la figura 6.64, el pH que logra la mayor disminución de la turbidez residual fue de 6. El pH inicial del agua fue de 7.93, y después del tratamiento fue de 7.63. La dosis utilizada para esta prueba fue de 100 mg/L.

Tabla 6.28 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 100 mg/L.

Réplicas	pH Inicial	7.93	5	6	7	8	9
No.	pH Final	7.63	4.75	5.81	6.76	7.64	8.5
No.	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	675.00	52.00	39.67	20.67	27.67	53.67	67.00
2	670.00	51.33	40.00	19.33	26.33	52.33	73.00
3	665.00	52.67	33.67	18.33	22.67	50.00	59.33
PROM.	670.00	52.00	37.78	19.44	25.56	52.00	66.44
% PROM	0.00	92.24	94.36	97.10	96.19	92.24	90.09

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

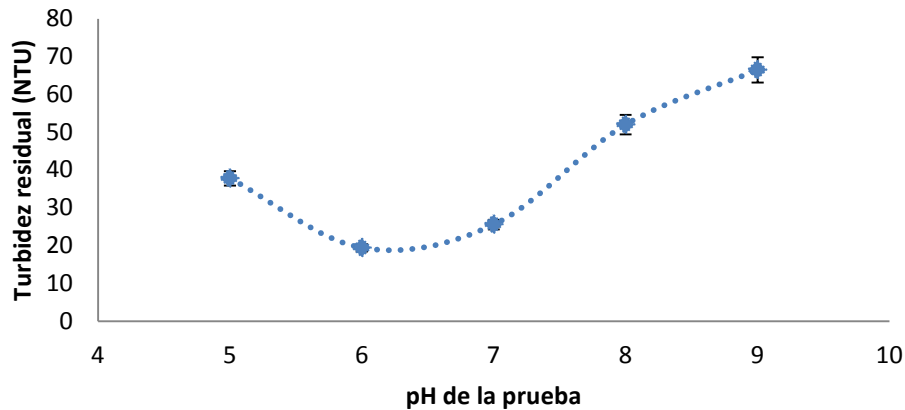


Figura 6.64 Turbidez residual del sulfato de aluminio en función del pH del agua.

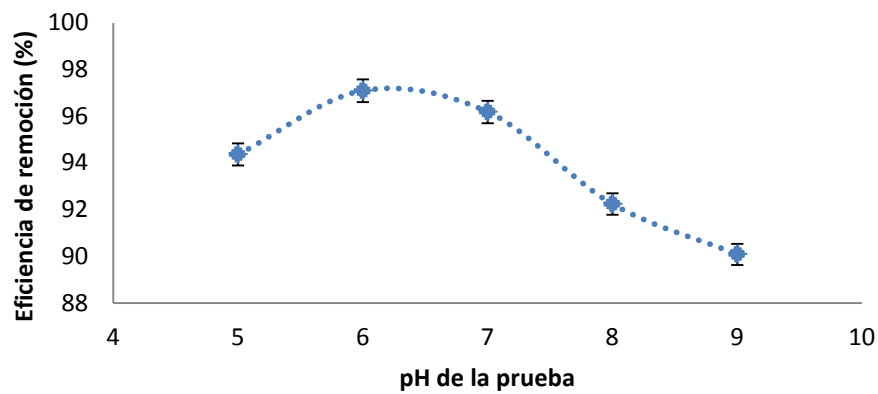


Figura 6.65 Eficiencia de remoción del sulfato de aluminio en función del pH del agua.

La figura 6.65 muestra que la mayor eficiencia se alcanzó con un pH de 6, siendo ésta de 97.1%, mientras que cuando no se ajustó el pH del agua, la eficiencia de remoción fue de 92.49%. El pH óptimo se alejó del determinado mediante las titulaciones de acidez superficial, el cual fue de 4.84.

6.7.2 Moringa

La tabla 6.29 muestra los resultados de las pruebas de pH para la dosis óptima de moringa.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 6.29 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 200 mg/L.

Réplicas	pH Inicial	7.94	5	6	7	8	9
No.	pH Final	7.74	4.91	5.87	6.93	7.75	8.62
	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	420.67	63.33	69.33	64.33	65.00	63.33	71.33
2	437.33	59.67	66.00	65.67	66.67	56.67	70.00
3	423.67	65.67	72.33	63.00	58.33	64.33	73.00
PROM.	427.22	62.89	69.22	64.33	63.33	61.44	71.44
% PROM	0.00	85.27	83.78	84.94	85.18	85.60	83.27

La figura 6.66 muestra que el pH que logra la mayor disminución de la turbidez residual fue de 8. El pH inicial (sin ajuste) del agua fue de 7.94, y después del tratamiento fue de 7.74. La dosis óptima que se utilizó en esta prueba fue de 200 mg/L.

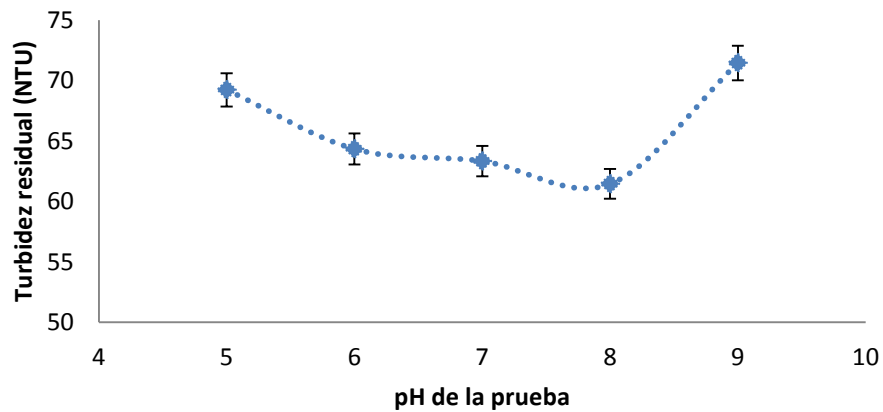


Figura 6.66 Turbidez residual de moringa en función del pH del agua.

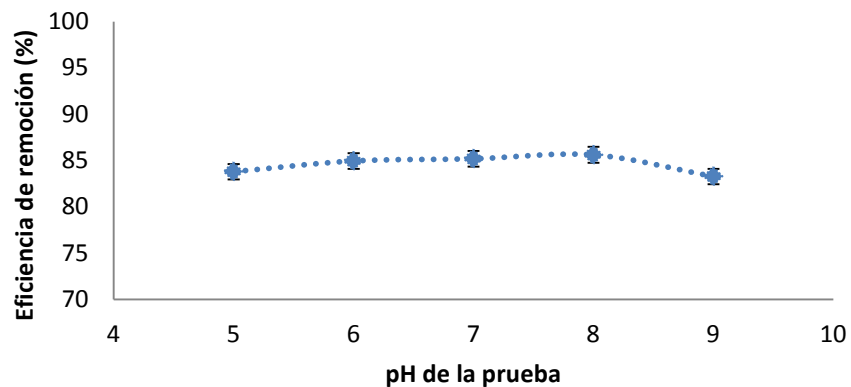


Figura 6.67 Eficiencia de remoción de moringa en función del pH del agua.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

La figura 6.67 muestra que la mayor eficiencia de remoción fue de 85.6%, y se alcanzó con un pH de 8. Tomando en cuenta este resultado como el pH óptimo de la moringa, y las condiciones iniciales del agua, se puede observar que no es necesario ajustar el pH del agua a tratar. El pH óptimo obtenido con las pruebas de jarras es muy cercano al que se obtuvo con el estudio de acidez superficial, que fue de 7.6.

6.7.3 Quitosano

El pH inicial del agua fue de 8.1, y al finalizar el proceso de coagulación y floculación fue de 7.61 La tabla 6.30 muestra las variaciones en la turbidez respecto al pH del agua a tratar.

Tabla 6.30 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 180 mg/L.

Réplicas	pH Inicial	8.1	5	6	7	8	9
No.	pH Final	7.61	4.59	5.74	6.68	7.61	8.52
	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	411.00	58.67	46.67	42.67	25.33	17.67	30.67
2	412.67	58.00	45.67	42.33	24.67	20.67	30.67
3	411.33	59.67	46.67	42.67	29.33	20.67	36.00
PROM.	411.67	58.78	46.33	42.56	26.44	19.67	32.44
% PROM	0.00	85.72	88.74	89.66	93.58	95.22	92.12

La figura 6.68 muestra que el pH que logró la mayor disminución de turbidez fue de 8. La dosis empleada para esta prueba fue de 180 mg/L.

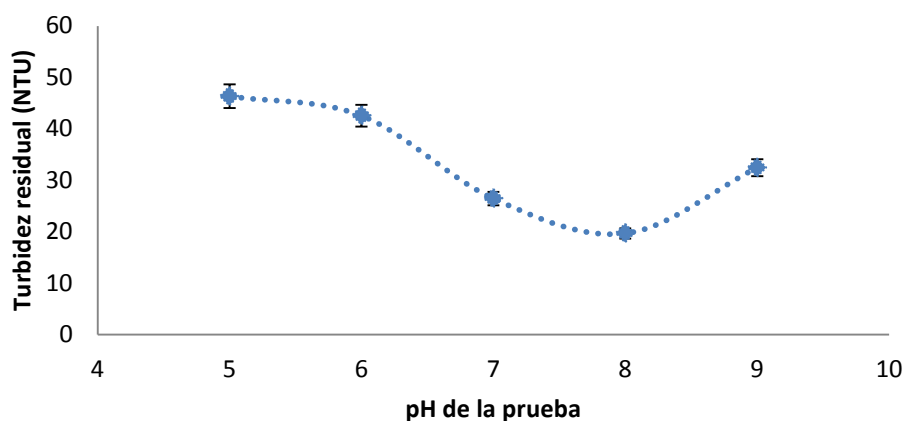


Figura 6.68 Turbidez residual de quitosano en función del pH del agua.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

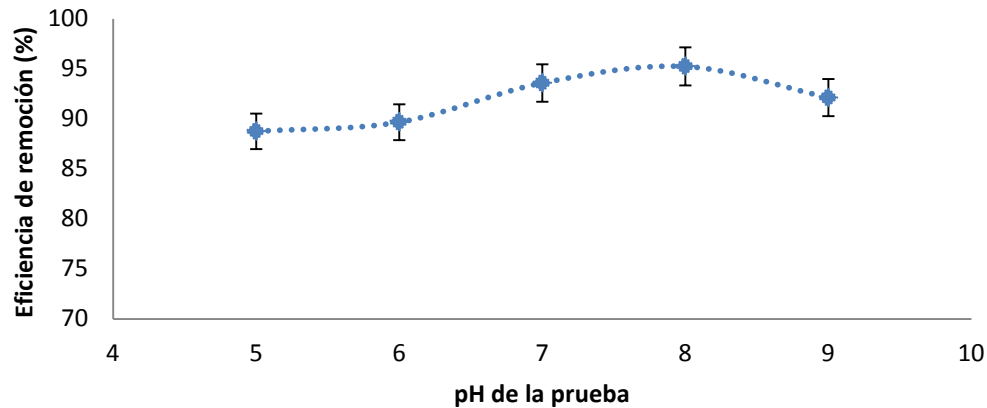


Figura 6.69 Eficiencia de remoción de quitosano en función del pH del agua.

La figura 6.69 muestra que el pH que logró la mayor eficiencia de remoción fue de 8, alcanzando una eficiencia de remoción de 95.22%, en la determinación de acidez superficial se encontró que el pH óptimo para el quitosano fue de 8.1, siendo similar al obtenido en las pruebas de jarras. Tomando en cuenta el pH inicial del agua, no es necesario agregar algún agente para ajustar el pH.

6.7.4 Mezcla M:Q 50:50

El pH inicial del agua fue de 8.19, y después del tratamiento disminuyó a 7.87. La tabla 6.31 muestra a detalle los resultados obtenidos. La figura 6.70 muestra que la combinación de coagulantes alcanzó la menor turbidez residual a un pH de 8. La dosis óptima utilizada para la determinación del pH óptimo fue de 20 mg/L.

Tabla 6.31 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 20 mg/L.

Réplicas	pH Inicial	8.19	5	6	7	8	9
No.	pH Final	7.87	4.89	5.933	6.92	7.62	8.47
	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	478.33	31.00	37.00	46.67	33.00	30.67	41.33
2	480.00	32.67	42.00	48.33	38.67	28.33	40.00
3	474.33	33.67	37.67	36.67	34.67	33.33	40.67
PROM.	477.56	32.44	38.89	43.89	35.44	30.78	40.67
% PROM	0.00	93.21	91.86	90.81	92.58	93.55	91.48

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

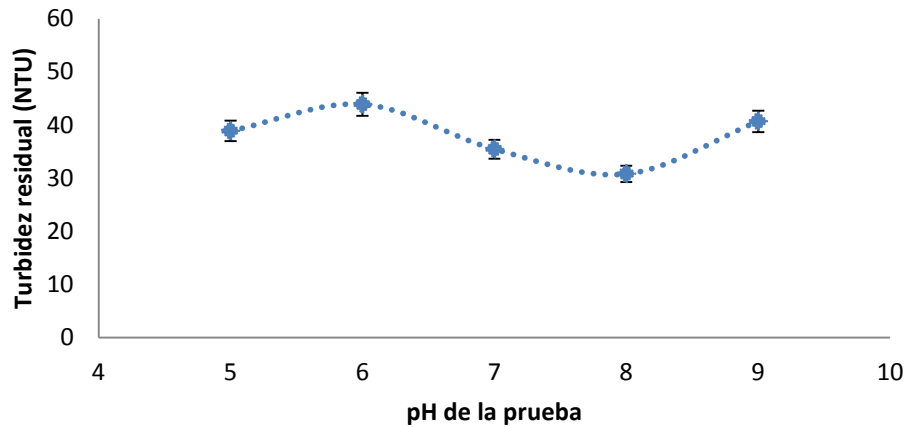


Figura 6.70 Turbidez residual de la mezcla M:Q 50:50 en función del pH del agua.

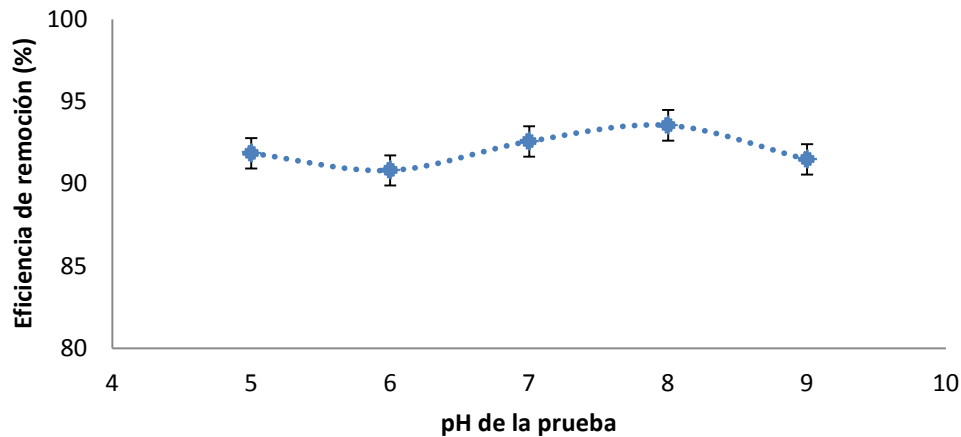


Figura 6.71 Eficiencia de remoción de la mezcla M:Q 50:50 en función del pH del agua.

La figura 6.71 muestra que al pH óptimo de 8, la eficiencia de remoción fue de 93.55%, tomando en cuenta las condiciones iniciales del agua, al utilizar esta combinación de coagulantes no es necesario modificar el pH del agua a tratar. Por otro lado, el pH óptimo obtenido en las pruebas de jarras se encontró entre los valores encontrados para la moringa y el quitosano en el estudio de acidez superficial (7.6 para moringa y 8.1) para quitosano.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

6.7.5 Mezcla M:Q 75:25

La tabla 6.32 muestra las condiciones iniciales y finales del pH, sin ajuste, que fueron de 8 y 7.9, respectivamente. La dosis óptima que se utilizó para esta prueba de 20 mg/L.

Tabla 6.32 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 20 mg/L.

Réplicas	pH Inicial	8.05	5	6	7	8	9
No.	pH Final	7.95	4.92	5.89	6.94	7.95	8.73
	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	490.33	24.00	40.00	31.67	25.67	21.33	34.67
2	475.33	22.67	41.33	37.00	25.33	21.00	32.33
3	484.67	21.00	46.00	38.67	26.67	19.33	41.00
PROM.	483.44	22.56	42.44	35.78	25.89	20.56	36.00
% PROM	0.00	95.33	91.22	92.59	94.64	95.75	92.56

Como se observa en la figura 6.72, la menor turbidez residual se obtuvo con un pH de 8, al igual que con los coagulantes naturales usados de manera individual

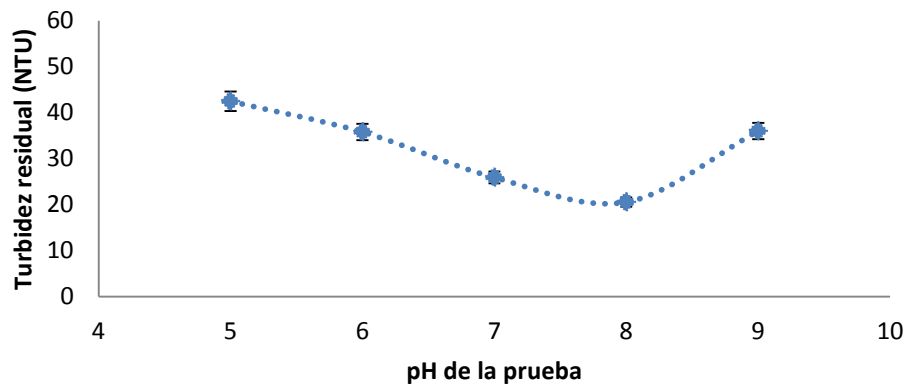


Figura 6.72 Turbidez residual de la mezcla M:Q 75:25 en función del pH del agua.

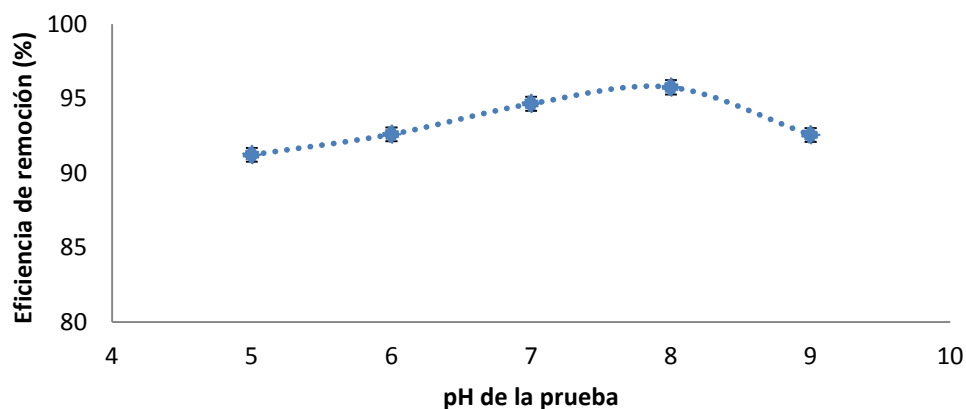


Figura 6.73 Eficiencia de remoción de la mezcla M:Q 75:25 en función del pH del agua.

La figura 6.73 muestra que al pH óptimo del proceso, de 8, la eficiencia de remoción de la mezcla fue de 95.75%. De igual forma que con la mezcla anterior, se puede apreciar que, debido a las condiciones iniciales del agua, no es necesario modificar el pH del agua antes de tratarla con esta combinación de coagulantes.

6.7.6 Mezcla M:Q 25:75

La dosis óptima para esta mezcla fue de 200 mg/L; el pH inicial del agua a tratar fue de 8.2, y después del proceso disminuyó a 7.7, como se muestra en la tabla 6.33.

Tabla 6.33 Resultados de las pruebas para pH óptimo, con dosis de 200 mg/L.

Réplicas	pH inicial	8.2	5	6	7	8	9
No.	pH final	7.73	4.87	5.82	6.45	7.79	8.69
	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	445.67	27.67	63.00	47.00	24.67	25.00	34.00
2	471.33	27.33	56.67	53.67	27.67	23.67	36.67
3	465.33	29.33	61.67	55.67	28.00	25.00	36.33
PROM.	460.78	28.11	60.44	52.11	26.78	24.56	35.67
% PROM	0.00	93.90	86.86	88.70	94.19	94.67	92.26

La figura 6.74 muestra que el pH óptimo de coagulación para esta mezcla se encuentra entre 7 y 8.

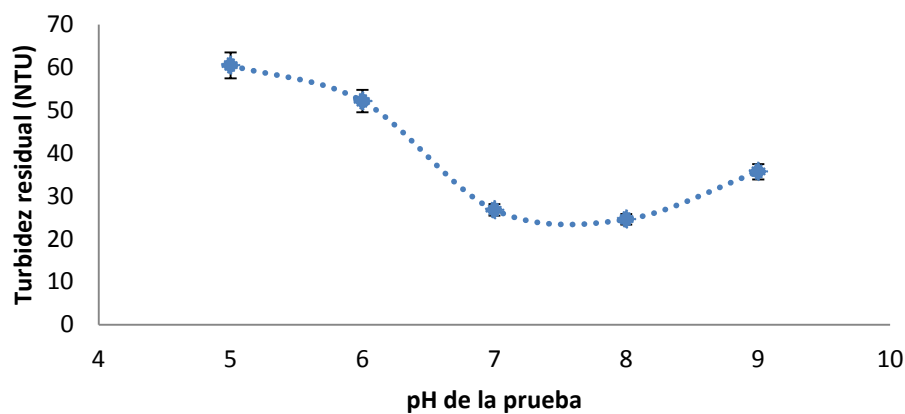


Figura 6.74 Turbidez residual de la mezcla M:Q 25:75 en función del pH del agua.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

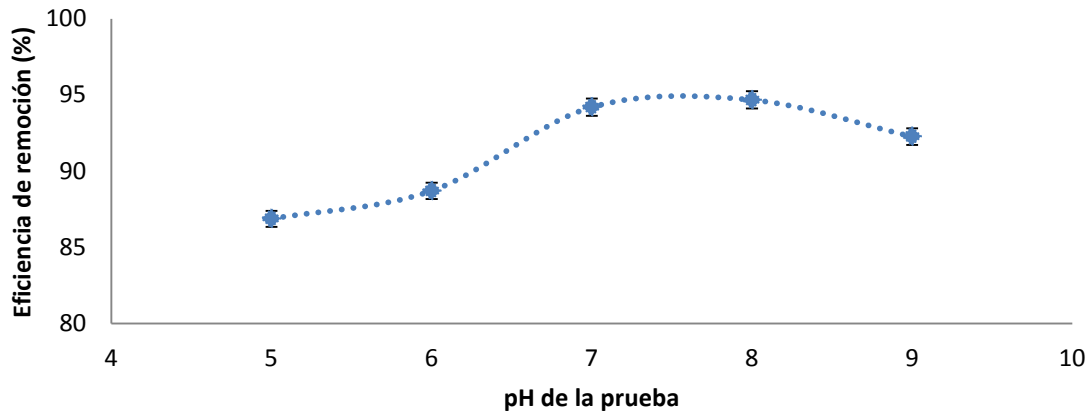


Figura 6.75 Eficiencia de remoción de la mezcla M:Q 25:75 en función del pH del agua.

La figura 6.75 muestra que la mayor eficiencia de remoción, correspondiente al pH óptimo de operación, fue 94.67% y un pH de 8. Con un pH de 7 se alcanzó una eficiencia de remoción ligeramente menor (94.19%), sin embargo, tomando en cuenta que el pH de agua a la entrada del tratamiento fue de 8.2, se seleccionó 8 como valor óptimo de pH.

6.7.7 pH óptimo para cada coagulante

De acuerdo a las pruebas de jarras realizadas, los valores de pH para cada coagulante, tanto individualmente como sus mezclas, ello se muestran en la siguiente tabla (6.34)

Tabla 6.34 Valores de pH óptimo para cada coagulante.

Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	pH óptimo	pH final	Eficiencia %
Sulfato de aluminio	100	6	5.8	97.10
Moringa	200	8	7.8	85.60
Quitosano	180	8	7.6	95.22
M:Q 50:50	20	8	7.6	93.55
M:Q 75:25	20	8	7.9	95.75
M:Q 25:75	200	8	7.8	94.67

Como se puede observar en la tabla anterior, el sulfato de aluminio alcanzó la mayor eficiencia de remoción una vez que se optimizaron las condiciones del proceso. Sin embargo, para esto, es necesario ajustar el valor del pH del agua que será sometida a tratamiento, esto involucra un costo extra para el proceso. Por otro lado, los coagulantes naturales pueden operar a las condiciones iniciales del agua residual a tratar, que se encontró en el intervalo de 7.8-8.2. El rendimiento individual de los coagulantes naturales requirió trabajar con dosis altas para poder alcanzar eficiencias de remoción comparables

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

a las mostradas por el sulfato de aluminio, sin embargo, cuando se utilizaron las combinaciones de los coagulantes naturales, se observó una disminución considerable en las dosis óptimas. De los coagulantes naturales y las mezclas probadas en la fase experimental, la que dio mejores resultados fue la mezcla M:Q 75:25, que alcanzó una eficiencia de remoción de 95.22%, equiparable a la obtenida usando sulfato de aluminio, pero usando una dosis de sólo 20 mg/L, contra la dosis de 100 mg/L de sulfato de aluminio necesaria para alcanzar un rendimiento de 97.10%.

6.8 Determinación del Potencial Zeta de los coagulantes

Se determinó el potencial zeta del agua residual y de los coagulantes utilizados en esta prueba, con el objetivo de conocer cómo interactúan los coagulantes con los coloides presentes en el agua a tratar.

6.8.1 Agua residual

En la figuras 6.76 y 6.77, se observan los resultados de movilidad electroforética y potencial Z para el agua de la presa Alzate, correspondiente a la trayectoria del río Lerma dentro de la presa: El análisis demuestra que hay valores positivos y negativos, lo que está asociado a la presencia de una mezcla de material coloidal y materia orgánica, donde predominan los detritos y material húmico, microalgas, coloides de Fe(III), posiblemente de manganeso y arcillas como las Kanditas (principalmente Halloysitas), que no sedimentan fácilmente (Barceló, 2000). La presencia de todo este material complejo se refleja en el diagrama de los valores del Potencial Z así como en los diferentes valores en la movilidad electroforética.

Tabla 6.35 Composición del sedimento y material particulado del agua de la presa José Antonio Alzate, Edo. de México (Tomado de Barceló, 2000).

Mineral	Presencia (en %)	Tamaño (en μm)
Metahalloysita+Halloysita	15	>2
Cristobalita	4	De 2 a 135
Feldespatos	58	>5 a75
Anfiboles	8	10 a 80
Hematita	7	2 a 175
Mica	2	10 a 20
Otras formas como: Dickita y Caolinita, etc.	1	No se determinó el tamaño
Material amorfo	5	1 a 190

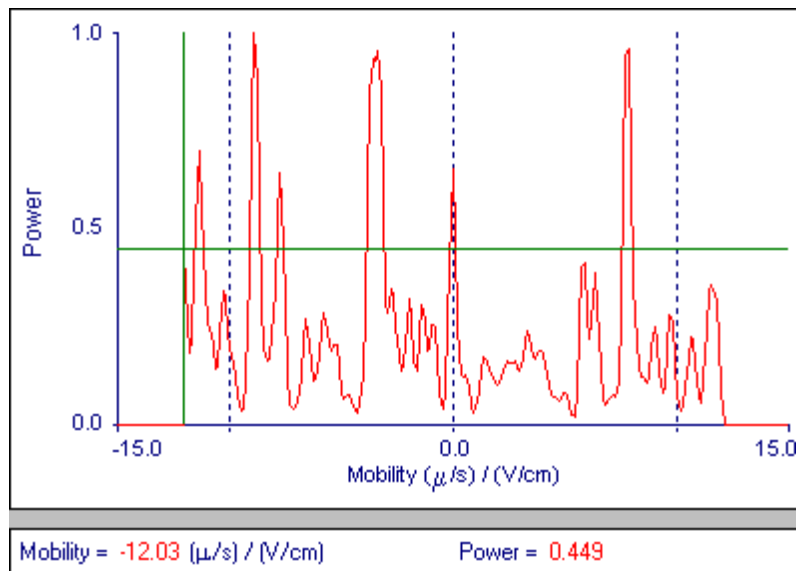


Figura 6.76 Movilidad electroforética medida en el agua residual.

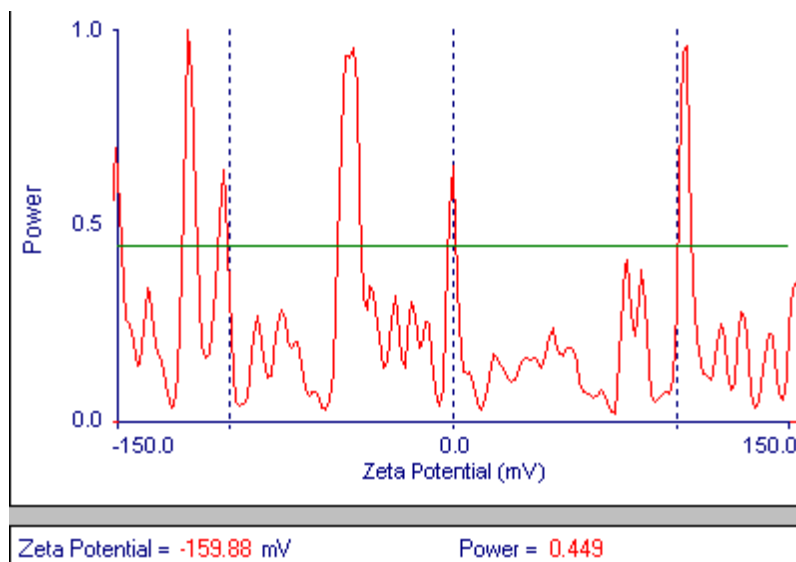


Figura 6.77 Potencial Z del agua residual.

6.8.2 Sulfato de aluminio

En la figura 6.78 se observa que este material prácticamente presentó movilidad en la zona negativa, y comparada con la figura 6.79, la forma de la gráfica indica una capa de Stern mucho más ancha, lo que significa que el tiempo de coagulación es muy rápido; esto último es la razón por la que es uno de los coagulantes más eficientes en el tratamiento de aguas residuales municipales. En el caso de la mezcla rápida se alcanzó la coagulación en un tiempo de 1 minuto con una velocidad de 150 rpm y una dosis de 100 mg/L.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

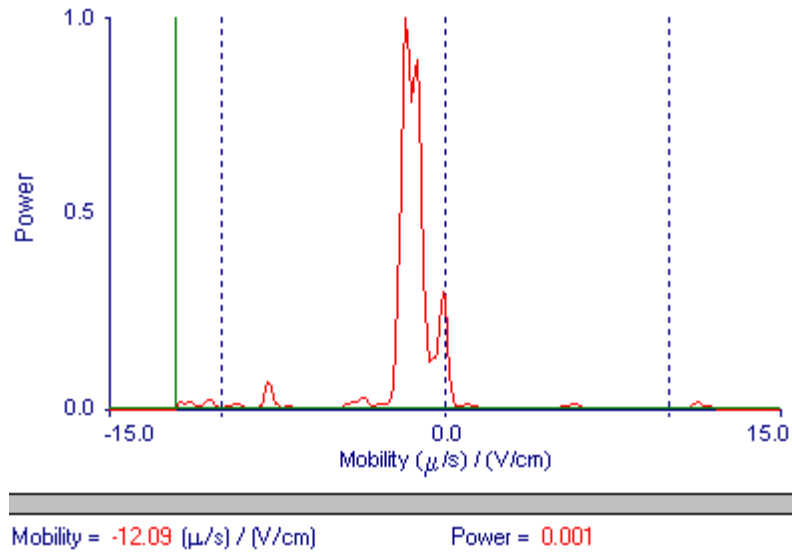


Figura 6.78 Movilidad electroforética medida con el sulfato de aluminio con dosis óptima.

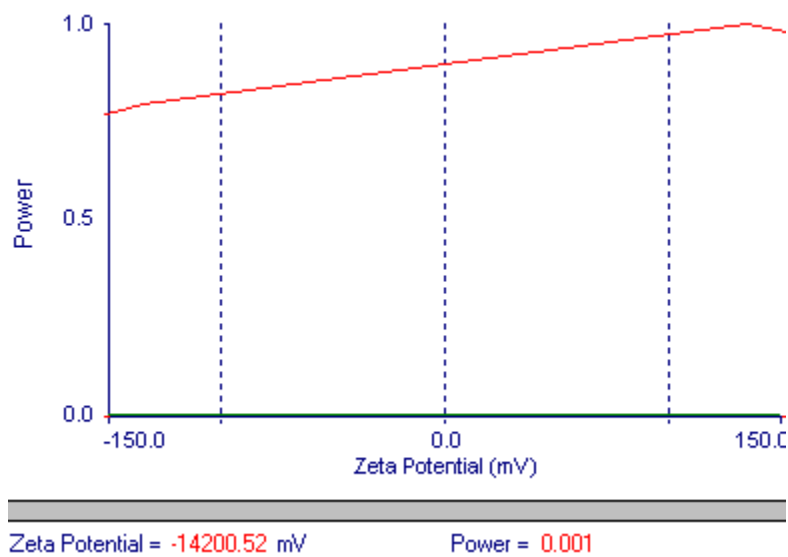


Figura 6.79 Potencial Z con sulfato de aluminio con dosis óptima.

6.8.3 Moringa

En el caso de la moringa, la movilidad es casi simétrica, con un 60% en la zona negativa y un 40% en la zona positiva, comparándola con el diagrama de potencial Z, presenta un pico que quiere decir que es poco eficiente el proceso de coagulación. El tiempo de mezcla rápida fue de 1 min con la dosis óptima (200 mg/L), con una velocidad de 200

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

rpm. Presenta un pico donde la capa de Stern es poco estable, por lo que no se recomienda usar este material como único coagulante.

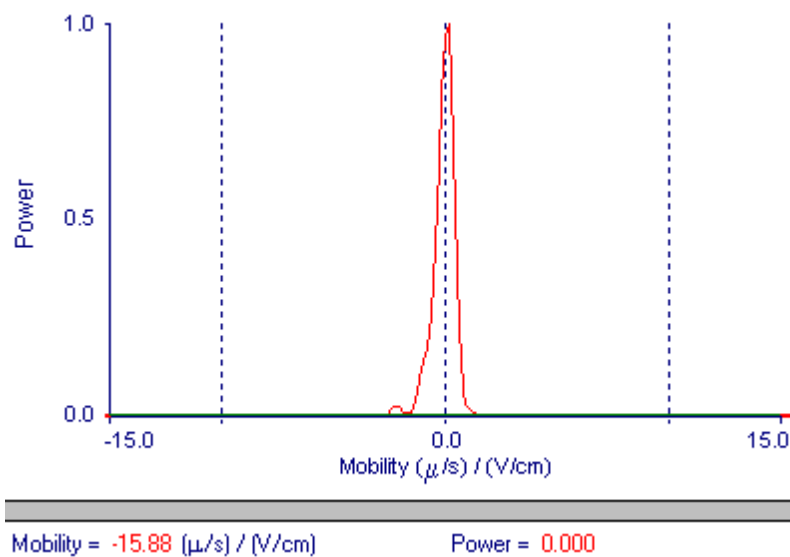


Figura 6.80 Movilidad electroforética medida con la moringa con dosis óptima.

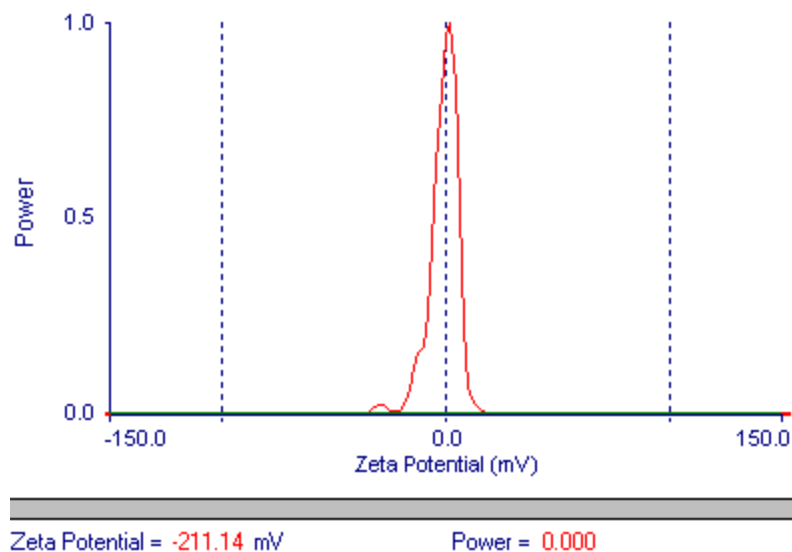


Figura 6.81 Potencial Z con moringa con dosis óptima.

6.8.4 Quitosano

El quitosano presenta una movilidad electroforética un poco compleja, comparada con los otros dos coagulantes; donde parece, al analizarlo con el potencial Z, un proceso más de adsorción que de coagulación, se usó una dosis de 180 mg/L, a una velocidad de 200 rpm

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

con un tiempo de mezcla rápida de un minuto. La capa de Stern, se observa con dos picos gruesos pero no en forma continua, en contraste con el aluminio, donde la capa es continua, es decir, se mantiene más tiempo el grosor de la capa de Stern. Por lo que no es del todo recomendable, usar quitosano puro como coagulante.

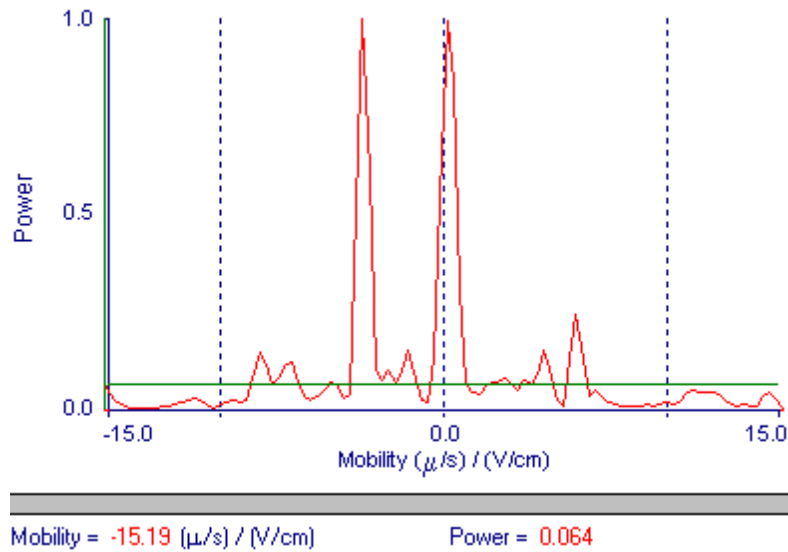


Figura 6.82 Movilidad electroforética medida con el quitosano con dosis óptima.

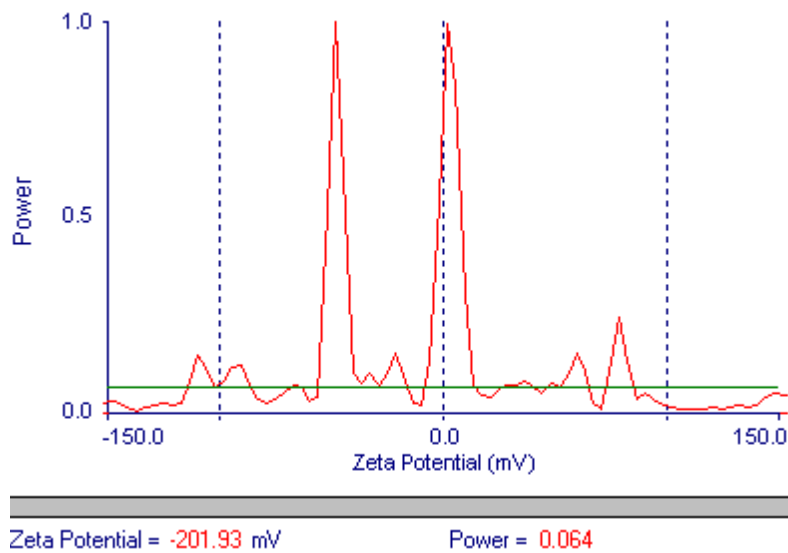


Figura 6.83 Potencial Z con quitosano con dosis óptima.

6.8.5 M:Q 50:50

En la figura 6.84 se observa un pico totalmente en la parte negativa, al generar una mezcla de relación 50:50 de moringa y quitosano. Sin embargo, a pesar de que en la gráfica de potencial zeta, se observa una capa de Stern sumamente delgada, esta mezcla puede funcionar como un coagulante con la ventaja de que el quitosano actúa también como floculante. La ventaja es que ambos son biodegradables, y en el caso del aluminio hay que utilizar un polímero u otro material como floculante.

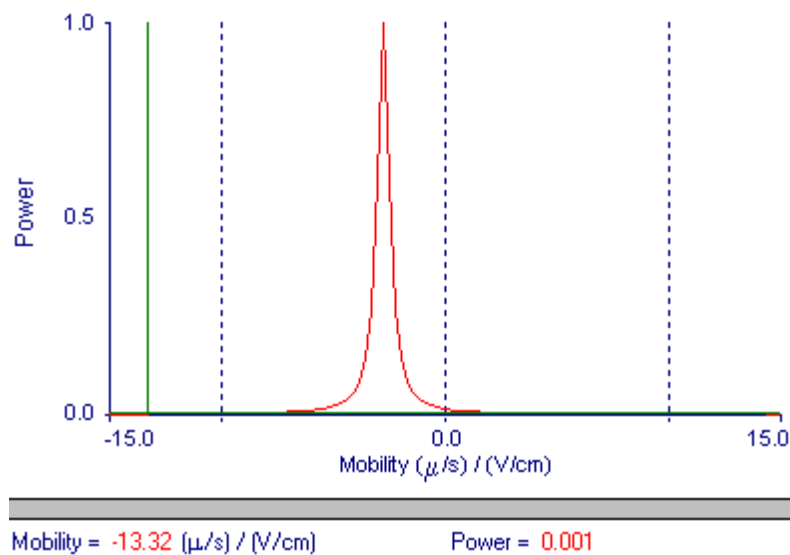


Figura 6.84 Movilidad electroforética medida con la combinación M:Q 50:50 con dosis óptima.

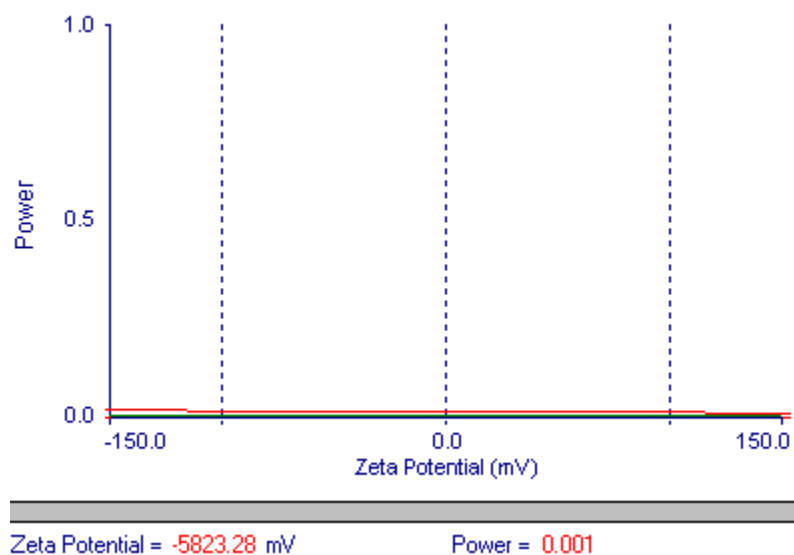


Figura 6.85 Potencial Z con la combinación M:Q 50:50 y dosis óptima.

6.8.6 M:Q 75:25

En la combinación con relación 75:25, la movilidad electroforética también está desplazada hacia la parte negativa y el grosor de la capa de Stern es mayor. En este caso se presentan dos ventajas, la primera es que se alcanza un mayor espesor de la capa de Stern respecto a la proporción moringa:quitosano anterior, y la segunda, que no se requiere floculante para alcanzar un rendimiento muy elevado de eficiencia de remoción, además de que ambos componentes son biodegradables.

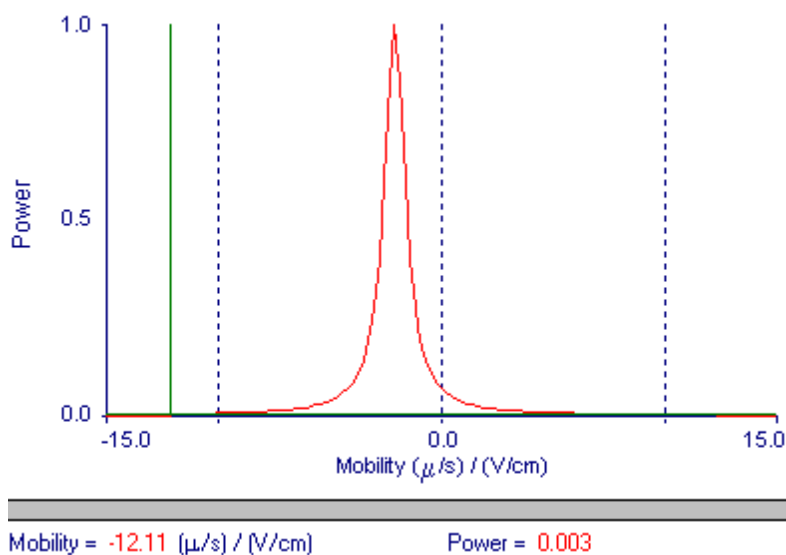


Figura 6.86 Movilidad electroforética medida con la combinación M:Q 75:25 con dosis óptima.

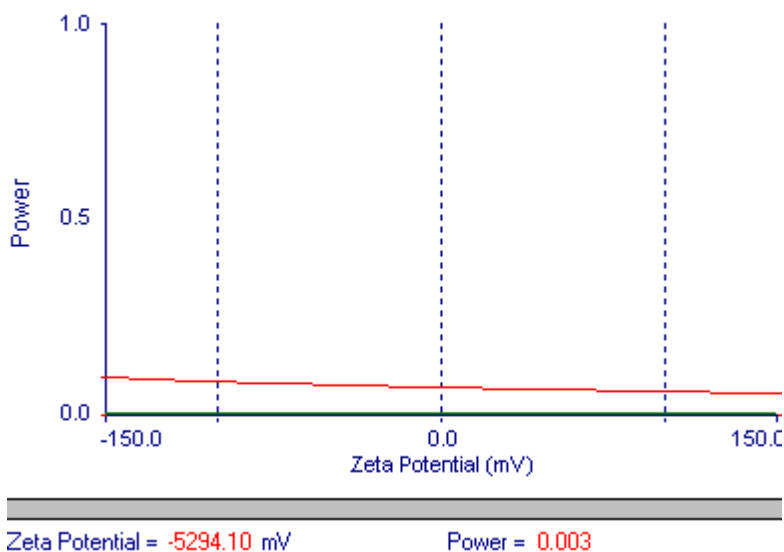


Figura 6.87 Potencial Z con la combinación M:Q 75:25 y dosis óptima.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

6.8.7 M:Q 25:75

En la proporción 25:75 también existe la ventaja de que la movilidad electroforética está desplazada en la zona negativa, con una capa de Stern más gruesa ligeramente mayor que la combinación anterior. Se presentan las dos ventajas del caso anterior, pero con la desventaja de que se requiere una mayor proporción de quitosano en este caso, lo cual encarece el proceso.

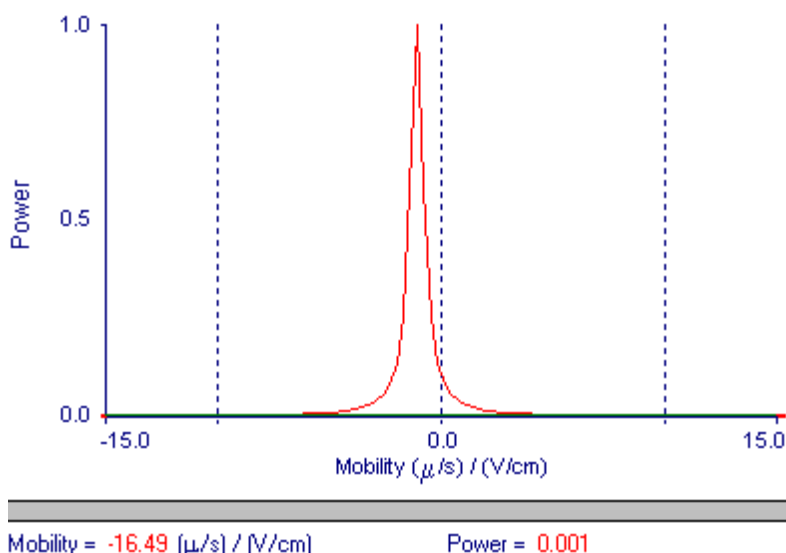


Figura 6.88 Movilidad electroforética medida con la combinación M:Q 75:25 con dosis óptima.

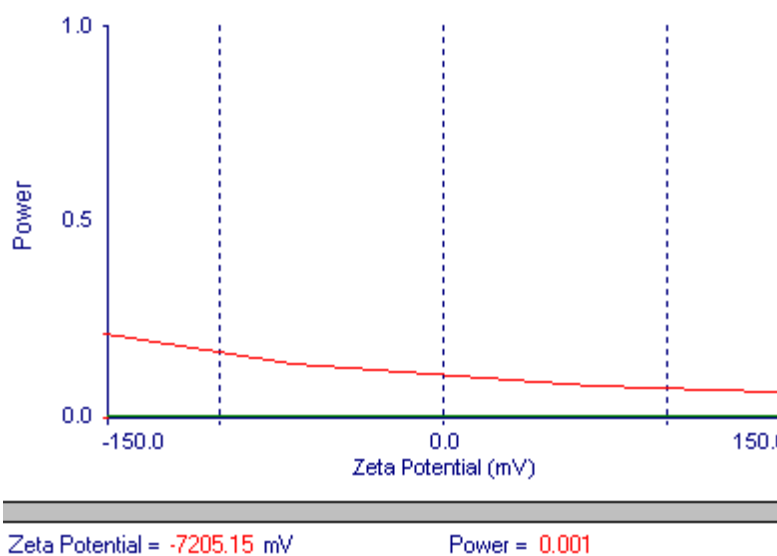


Figura 6.89 Potencial Z con la combinación M:Q 75:25 y dosis óptima.

7 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y COROLARIO

7.1 Conclusiones

El análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de jarras indica que la eficiencia de los coagulantes naturales es comparable con la del sulfato de aluminio, razón por la cual se pueden convertir en una alternativa al uso de este coagulante sintético.

La mezcla de coagulantes Moringa:Quitosano con relación 75:25 es la que presentó una mayor eficiencia respecto a la del sulfato de aluminio y de los coagulantes naturales usados individualmente, así como de las otras combinaciones de coagulantes; esta alcanzó con una dosis de 20 mg/L un rendimiento superior al 95%. **La mezcla de coagulantes naturales es una importante aportación de este proyecto.**

Los coagulantes naturales tanto individuales como sus mezclas, funcionaron con un pH óptimo de 8, como el agua a tratar tuvo el mismo pH, no fue necesario un ajuste, lo que reduce costos del proceso, por no requerir ningún agente para ajustar las condiciones iniciales del agua. La combinación M:Q 75:25 alcanzó un rendimiento de 95.75%. Por otro lado, en el caso del sulfato de aluminio fue necesario reducir el pH del agua para que se obtenga una mayor eficiencia.

Respecto al potencial Z, se puede sugerir que la moringa y las combinaciones en donde está presente, se comportan de manera similar al mecanismo del sulfato de aluminio, es decir, una desestabilización de la doble capa; mientras que en el caso del quitosano, el potencial Z, indicó que además existe un comportamiento como superficie adsorbente.

Una de las observaciones interesantes es que los coagulantes naturales funcionan mejor combinados, y a pesar de que la capa de Stern en el caso de la combinación 75:25 es menor, la cantidad utilizada de quitosano es baja, con la ventaja de que la moringa es mucho más económica ya que su proceso de extracción es simple; mientras que en el caso del quitosano, se requieren más etapas para su síntesis. Sin embargo, la mayor ventaja es que en la mezcla con quitosano no se requiere añadir un floculante, además de su poder superficial como adsorbente permite eliminar contaminantes.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Debido al hecho de que el quitosano proviene de un residuo (cáscara de camarón), se contribuye a la reducción de un desecho, reutilizándolo para la obtención de un producto biodegradable y al combinarlo con la moringa, los lodos generados en el proceso pueden ser estabilizados para usos posteriores.

El uso de los coagulantes naturales mejora el proceso de coagulación y floculación, con una mayor eficiencia en estos procesos que se alcanza utilizando dosis más bajas que las necesarias cuando se usan coagulantes metálicos.

Un punto muy importante para el rendimiento de los coagulantes **es la naturaleza y condiciones del agua que se someterá al tratamiento**. A lo largo de toda la fase experimental se trabajó con agua residual proveniente de un efluente de aguas residuales municipales ubicado en Tlachaloya, mismo que es descargado a la presa Alzate, perteneciente a la Cuenca Alta del río Lerma, también se trabajó con agua de la planta de tratamiento de la Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, y se observó que la variación del rendimiento de los coagulantes está en función de las condiciones del agua que entra al tratamiento.

7.2 Recomendaciones

1. Sería importante ya que se tiene la optimización de la relación moringa-quitosano, escalarla a nivel piloto.
2. Realizar un análisis de costos para la factibilidad a escala real.

7.3 Corolario

Se realizaron los análisis utilizando coagulantes naturales, tanto individualmente como en combinaciones, y fueron comparados con el sulfato de aluminio, si bien este último resulta ser el mejor coagulante, requiere de un floculante, donde se usa un polímero no biodegradable; situación que no sucede en la mezcla de los dos coagulantes naturales utilizados para la remoción de la turbidez de un agua con alto material particulado que no sedimenta por su tamaño. La hipótesis propuesta en conjunto con el objetivo general y los específicos, más los resultados experimentales se cumplieron en esta propuesta de tesis. La aportación más importante de este proyecto es la demostración de la optimización de la capacidad coagulante-floculante y de la proporción moringa-quitosano (75:25) en el proceso de la eliminación de la turbidez de un agua con alto contenido de material en suspensión, además de ser biodegradables, que permite el estabilizar los lodos y su posterior reutilización como por ejemplo, en vermicomposteo, composteo para suelos que se pueden utilizar en parques o quizás llegar al grado agrícola, donde se puede manejar para suelos orgánicos.

8. APENDICES

A.1 APÉNDICE A: Tablas de resultados de acidez superficial

Tabla 8.1 Datos de la determinación de acidez superficial del Sulfato de Aluminio con KOH.

V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV	V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	3.434	-0.194	0.50	-0.388	5.50	4.004	-0.045	0.50	-0.090
0.50	3.628	-0.083	0.50	-0.166	6.00	4.049	-0.033	0.50	-0.066
1.00	3.711	-0.048	0.50	-0.096	6.50	4.082	-0.054	0.50	-0.108
1.50	3.759	-0.037	0.50	-0.074	7.00	4.136	-0.067	0.50	-0.134
2.00	3.796	-0.035	0.50	-0.07	7.50	4.203	-0.086	0.50	-0.172
2.50	3.831	-0.029	0.50	-0.058	8.00	4.289	-0.129	0.50	-0.258
3.00	3.860	-0.011	0.25	-0.044	8.50	4.418	-0.411	0.50	-0.822
3.25	3.871	-0.009	0.25	-0.036	9.00	4.829	-1.823	1.00	-1.823
3.50	3.880	0.002	0.10	0.020	10.00	6.652	-0.918	0.50	-1.836
3.60	3.878	-0.009	0.10	-0.090	10.50	7.570	-0.965	0.50	-1.930
3.70	3.887	-0.007	0.10	-0.070	11.00	8.535	-0.375	0.10	-3.750
3.80	3.894	-0.010	0.20	-0.050	11.10	8.910	-0.123	0.10	-1.230
4.00	3.904	-0.006	0.10	-0.060	11.20	9.033	-0.283	0.15	-1.887
4.10	3.910	-0.005	0.10	-0.050	11.35	9.316	-0.154	0.15	-1.027
4.20	3.915	-0.002	0.10	-0.020	11.50	9.470	-0.095	0.10	-0.950
4.30	3.917	-0.007	0.10	-0.070	11.60	9.565	-0.085	0.10	-0.850
4.40	3.924	-0.004	0.10	-0.040	11.70	9.650	-0.080	0.10	-0.800
4.50	3.928	-0.002	0.10	-0.020	11.80	9.730	-0.130	0.20	-0.650
4.60	3.930	-0.014	0.10	-0.140	12.00	9.860	-0.025	1.00	-0.025
4.70	3.944	0.001	0.10	0.010	13.00	9.885	0.005	0.50	0.010
4.80	3.943	-0.005	0.10	-0.050	13.50	9.880	-0.020	0.50	-0.040
4.90	3.948	-0.021	0.10	-0.210	14.00	9.900	-0.030	0.50	-0.060
5.00	3.969	-0.035	0.50	-0.070	14.50	9.930	9.930	-14.50	-0.685

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.2 Datos de la determinación de acidez superficial del Sulfato de Aluminio – KNO₃ (electrolito soporte), con KOH.

V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV	V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	3.523	-0.18	0.50	-0.37	11.50	10.326	-0.09	0.50	-0.18
0.50	3.707	-0.08	0.50	-0.15	12.00	10.416	-0.10	0.50	-0.19
1.00	3.783	-0.04	0.50	-0.09	12.50	10.512	-0.26	0.50	-0.53
1.50	3.827	-0.04	0.50	-0.07	13.00	10.777	-0.73	0.50	-1.47
2.00	3.863	-0.03	0.50	-0.07	13.00	10.920	-0.08	0.25	-0.32
2.50	3.896	-0.02	0.50	-0.04	13.25	11.000	-0.14	0.25	-0.55
3.00	3.917	-0.03	0.50	-0.06	13.50	11.138	0.01	0.50	0.02
5.50	4.110	-0.04	0.50	-0.08	14.00	11.130	-0.19	0.50	-0.38
6.00	4.150	-0.11	0.50	-0.22	14.50	11.321	0.04	0.50	0.07
6.50	4.260	-0.15	0.50	-0.30	15.00	11.286	-0.05	0.50	-0.11
7.00	4.410	-0.43	0.50	-0.87	15.50	11.340	-0.05	0.50	-0.10
7.50	4.843	-1.26	0.50	-2.52	16.00	11.390	-0.05	0.50	-0.09
8.00	6.105	-0.93	0.50	-1.86	16.50	11.436	-0.03	2.00	-0.02
8.50	7.033	-1.29	0.50	-2.57	18.50	11.470	-0.03	0.50	-0.07
9.00	8.319	-1.08	0.50	-2.16	19.00	11.504	-0.03	0.50	-0.06
9.50	9.397	-0.44	0.50	-0.88	19.50	11.533	11.53	-19.50	-0.59
10.00	9.837	-0.22	0.50	-0.44	23.50	12.705	-0.01	0.50	-0.02
10.50	10.055	-0.15	0.50	-0.30	25.00	12.746	12.75	-25.00	-0.51
11.00	10.204	-0.12	0.50	-0.24					

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.3 Datos de la determinación de acidez superficial del coagulante de semillas de moringa con KOH.

V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV	V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	6.481	-2.470	0.100	-24.700	3.10	12.523	-0.022	0.100	-0.220
0.10	8.951	-0.484	0.100	-4.840	3.20	12.545	-0.015	0.100	-0.150
0.20	9.435	-0.743	0.100	-7.430	3.30	12.560	-0.010	0.100	-0.100
0.30	10.178	-0.550	0.100	-5.500	3.40	12.570	-0.013	0.100	-0.130
0.40	10.728	-0.505	0.100	-5.050	3.50	12.583	-0.015	0.100	-0.150
0.50	11.233	-0.154	0.100	-1.540	3.60	12.598	-0.007	0.100	-0.070
0.60	11.387	-0.120	0.100	-1.200	3.70	12.605	-0.013	0.100	-0.130
0.70	11.507	-0.126	0.100	-1.260	3.80	12.618	-0.012	0.100	-0.120
0.80	11.633	-0.196	0.100	-1.960	3.90	12.630	-0.010	0.100	-0.100
0.90	11.829	-0.031	0.100	-0.310	4.00	12.640	-0.009	0.100	-0.090
1.00	11.860	-0.202	0.300	-0.673	4.10	12.649	-0.012	0.100	-0.120
1.30	12.062	-0.030	0.100	-0.300	4.20	12.661	-0.005	0.100	-0.050
1.40	12.092	-0.048	0.100	-0.480	4.30	12.666	-0.014	0.100	-0.140
1.50	12.140	-0.056	0.100	-0.560	4.40	12.680	-0.008	0.100	-0.080
1.60	12.196	-0.036	0.100	-0.360	4.50	12.688	-0.005	0.100	-0.050
1.70	12.232	-0.022	0.100	-0.220	4.60	12.693	-0.009	0.100	-0.090
1.80	12.254	-0.021	0.100	-0.210	4.70	12.702	-0.007	0.100	-0.070
1.90	12.275	-0.024	0.100	-0.240	4.80	12.709	-0.009	0.100	-0.090
2.00	12.299	-0.035	0.100	-0.350	4.90	12.718	-0.006	0.100	-0.060
2.10	12.334	-0.027	0.100	-0.270	5.00	12.724	-0.008	0.100	-0.080
2.20	12.361	-0.019	0.100	-0.190	5.10	12.732	-0.008	0.100	-0.080
2.30	12.380	-0.026	0.100	-0.260	5.20	12.740	-0.007	0.100	-0.070
2.40	12.406	-0.011	0.100	-0.110	5.30	12.747	-0.005	0.100	-0.050
2.50	12.417	-0.026	0.100	-0.260	5.40	12.752	-0.006	0.100	-0.060
2.60	12.443	-0.020	0.100	-0.200	5.50	12.758	-0.007	0.100	-0.070
2.70	12.463	-0.021	0.100	-0.210	5.60	12.765	-0.006	0.100	-0.060
2.80	12.484	-0.014	0.100	-0.140	5.70	12.771	-0.006	0.100	-0.060
2.90	12.498	-0.019	0.100	-0.190	5.80	12.777	-0.006	0.100	-0.060
3.00	12.517	-0.006	0.100	-0.060	5.90	12.783	-0.006	0.100	-0.060

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.4 Datos de la determinación de acidez superficial del coagulante de semillas de moringa – KNO₃ (electrolito soporte), con KOH.

V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV	V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	5.486	-1.363	0.10	-13.630	3.10	12.484	-0.015	0.10	-0.150
0.10	6.849	-0.771	0.10	-7.710	3.20	12.499	-0.020	0.10	-0.200
0.20	7.620	-2.490	0.10	-24.900	3.30	12.519	-0.006	0.10	-0.060
0.30	10.110	-0.666	0.10	-6.660	3.40	12.525	-0.015	0.10	-0.150
0.40	10.776	-0.520	0.10	-5.200	3.50	12.540	-0.016	0.10	-0.160
0.50	11.296	-0.219	0.10	-2.190	3.60	12.556	-0.003	0.10	-0.030
0.60	11.515	-0.147	0.10	-1.470	3.70	12.559	-0.030	0.20	-0.150
0.70	11.662	-0.071	0.10	-0.710	3.90	12.589	-0.013	0.10	-0.130
0.80	11.733	-0.097	0.10	-0.970	4.00	12.602	0.002	0.10	0.020
0.90	11.830	-0.063	0.10	-0.630	4.10	12.600	-0.010	0.10	-0.100
1.00	11.893	-0.040	0.10	-0.400	4.20	12.610	-0.035	0.30	-0.117
1.10	11.933	-0.027	0.10	-0.270	4.50	12.645	-0.009	0.20	-0.045
1.20	11.960	-0.063	0.10	-0.630	4.70	12.654	-0.019	0.10	-0.190
1.30	12.023	-0.056	0.10	-0.560	4.80	12.673	-0.004	0.10	-0.040
1.40	12.079	-0.035	0.10	-0.350	4.90	12.677	-0.008	0.10	-0.080
1.50	12.114	-0.033	0.10	-0.330	5.00	12.685	-0.014	0.10	-0.140
1.60	12.147	-0.043	0.10	-0.430	5.10	12.699	-0.005	0.10	-0.050
1.70	12.190	-0.026	0.10	-0.260	5.20	12.704	-0.007	0.10	-0.070
1.80	12.216	-0.059	0.20	-0.295	5.30	12.711	-0.007	0.10	-0.070
2.00	12.275	-0.048	0.20	-0.240	5.40	12.718	-0.009	0.10	-0.090
2.20	12.323	-0.104	0.50	-0.208	5.50	12.727	-0.011	0.10	-0.110
2.70	12.427	-0.006	0.10	-0.060	5.60	12.738	-0.004	0.10	-0.040
2.80	12.433	-0.020	0.10	-0.200	5.70	12.742	-0.158	0.10	-1.580
2.90	12.453	-0.024	0.10	-0.240	5.80	12.900	12.900	-5.80	-2.224
3.00	12.477	-0.007	0.10	-0.070					

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.5 Datos de la determinación de acidez superficial del quitosano sintetizado con KOH.

V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV	V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	1.390	0.000	0.500	0.000	13.50	12.372	-0.040	0.500	-0.080
0.50	1.390	-0.004	0.500	-0.008	14.00	12.412	-0.044	0.500	-0.088
1.00	1.394	-0.003	0.500	-0.006	14.50	12.456	-0.039	0.500	-0.078
1.50	1.397	-0.206	0.500	-0.412	15.00	12.495	-0.035	0.500	-0.070
2.00	1.603	-0.230	0.500	-0.460	15.50	12.530	-0.022	0.500	-0.044
2.50	1.833	-0.199	0.500	-0.398	16.00	12.552	-0.026	0.500	-0.052
3.00	2.032	-0.690	1.000	-0.690	16.50	12.578	-0.023	0.500	-0.046
4.00	2.722	-1.044	1.000	-1.044	17.00	12.601	-0.021	0.500	-0.042
5.00	3.766	-1.123	1.000	-1.123	17.50	12.622	-0.020	0.500	-0.040
6.00	4.889	-1.334	0.500	-2.668	18.00	12.642	-0.022	0.500	-0.044
6.50	6.223	0.011	0.500	0.022	18.50	12.664	-0.022	0.500	-0.044
7.00	6.212	-0.245	0.500	-0.490	19.00	12.686	-0.015	0.500	-0.030
7.50	6.457	-0.117	0.500	-0.234	19.50	12.701	-0.016	0.500	-0.032
8.00	6.574	-0.224	0.500	-0.448	20.00	12.717	-0.013	0.500	-0.026
8.50	6.798	-0.890	0.500	-1.780	20.50	12.730	-0.004	0.500	-0.008
9.00	7.688	-3.462	0.500	-6.924	21.00	12.734	-0.014	0.500	-0.028
9.50	11.150	-0.488	0.500	-0.976	21.50	12.748	-0.016	0.500	-0.032
10.00	11.638	-0.235	0.500	-0.470	22.00	12.764	-0.018	0.500	-0.036
10.50	11.873	-0.139	0.500	-0.278	22.50	12.782	-0.008	0.500	-0.016
11.00	12.012	-0.096	0.500	-0.192	23.00	12.790	0.168	0.500	0.336
11.50	12.108	-0.100	0.500	-0.200	23.50	12.622	0.015	0.500	0.030
12.00	12.208	-0.053	0.500	-0.106	24.00	12.607	0.002	0.500	0.004
12.50	12.261	-0.056	0.500	-0.112	24.50	12.605	0.007	0.500	0.014
13.00	12.317	-0.055	0.500	-0.110	25.00	12.598	12.598	-25.000	-0.504

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.6 Datos de la determinación de acidez superficial del quitosano sintetizado – KNO₃ (electrolito soporte), con KOH.

V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV	V KOH	pH	dpH	dV	dpH/dV
0.00	1.560	-0.161	1.00	-0.161	11.50	12.275	-0.064	0.50	-0.128
1.00	1.721	-0.281	1.00	-0.281	12.00	12.339	-0.033	0.50	-0.066
2.00	2.002	-1.273	1.00	-1.273	12.50	12.372	-0.036	0.50	-0.072
3.00	3.275	-2.156	0.50	-4.312	13.00	12.408	-0.023	0.50	-0.046
3.50	5.431	-0.133	0.10	-1.330	13.50	12.431	-0.028	0.50	-0.056
3.60	5.564	-0.095	0.10	-0.950	14.00	12.459	-0.022	0.50	-0.044
3.70	5.659	-0.078	0.10	-0.780	14.50	12.481	-0.025	0.50	-0.050
3.80	5.737	-0.120	0.20	-0.600	15.00	12.506	-0.016	0.50	-0.032
4.00	5.857	-0.131	0.20	-0.655	15.50	12.522	-0.020	0.50	-0.040
4.20	5.988	-0.096	0.20	-0.480	16.00	12.542	-0.016	0.50	-0.032
4.40	6.084	-0.089	0.20	-0.445	16.50	12.558	-0.013	0.50	-0.026
4.60	6.173	-0.095	0.20	-0.475	17.00	12.571	-0.020	0.50	-0.040
4.80	6.268	-0.076	0.20	-0.380	17.50	12.591	-0.014	0.50	-0.028
5.00	6.344	-0.060	0.20	-0.300	18.00	12.605	-0.014	0.50	-0.028
5.20	6.404	-0.049	0.20	-0.245	18.50	12.619	-0.010	0.50	-0.020
5.40	6.453	-0.022	0.20	-0.110	19.00	12.629	-0.011	0.50	-0.022
5.60	6.475	-0.085	0.40	-0.213	19.50	12.640	-0.010	0.50	-0.020
6.00	6.560	-0.280	0.50	-0.560	20.00	12.650	-0.010	0.50	-0.020
6.50	6.840	-0.360	0.50	-0.720	20.50	12.660	-0.013	0.50	-0.026
7.00	7.200	-0.956	0.50	-1.912	21.00	12.673	-0.012	0.50	-0.024
7.50	8.156	-2.903	0.50	-5.806	21.50	12.685	-0.013	0.50	-0.026
8.00	11.059	-0.529	0.50	-1.058	22.00	12.698	-0.010	0.50	-0.020
8.50	11.588	-0.216	0.50	-0.432	22.50	12.708	-0.013	0.50	-0.026
9.00	11.804	-0.155	0.50	-0.310	23.00	12.721	-0.017	0.50	-0.034
9.50	11.959	-0.122	0.50	-0.244	23.50	12.738	-0.020	0.50	-0.040
10.00	12.081	-0.071	0.50	-0.142	24.00	12.758	-0.012	0.50	-0.024
10.50	12.152	-0.074	0.50	-0.148	24.50	12.770	-0.010	0.50	-0.020
11.00	12.226	-0.049	0.50	-0.098	25.00	12.780	12.780	-25.00	-0.511

A.2 APÉNDICE B: Curvas de calibración de Absorción atómica

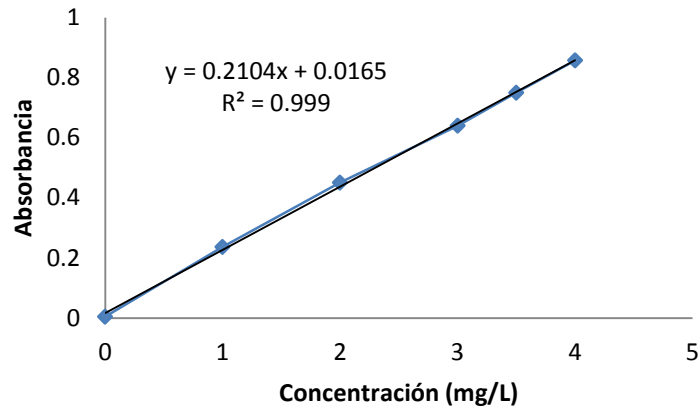


Figura 8.1 Curva de calibración para el Calcio.

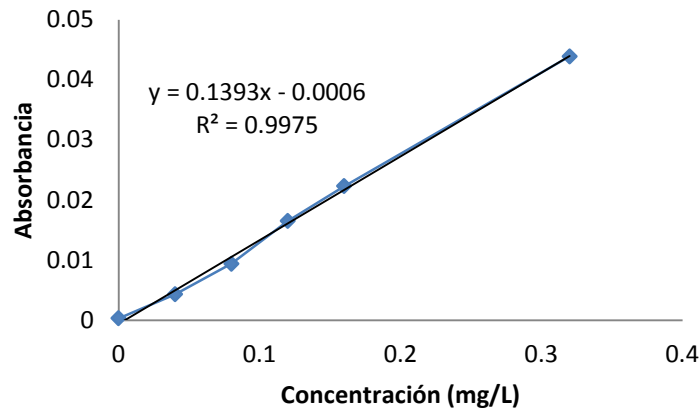


Figura 8.2 Curva de calibración para el Cobre.

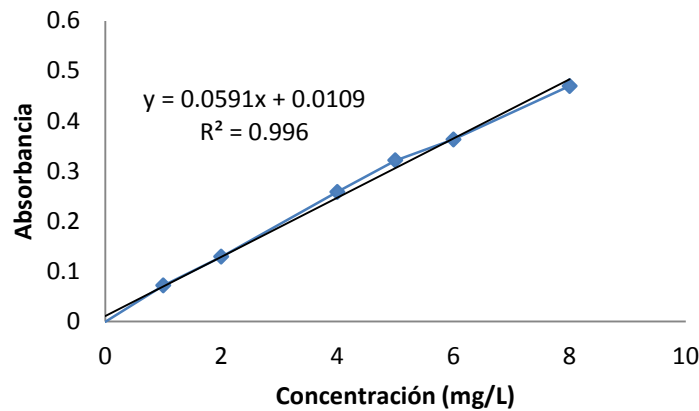


Figura 8.3 Curva de calibración para el Hierro.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

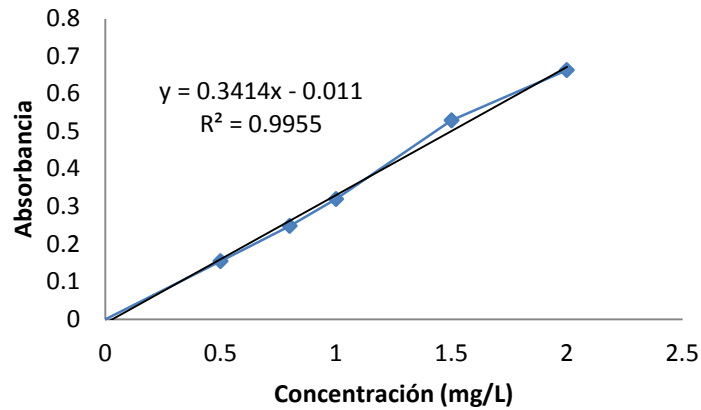


Figura 8.4 Curva de calibración para el Potasio.

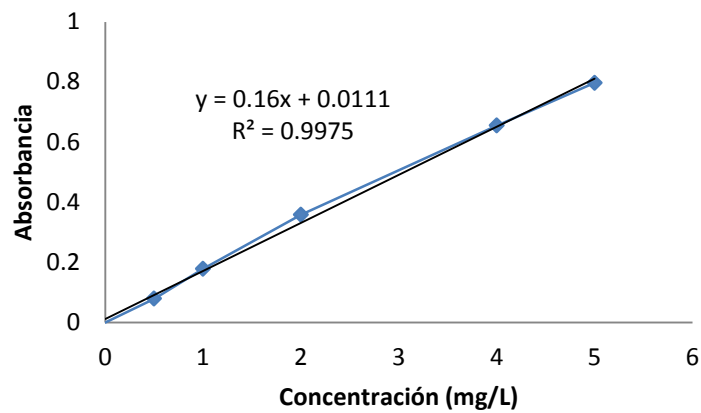


Figura 8.5 Curva de calibración para el Manganeso.

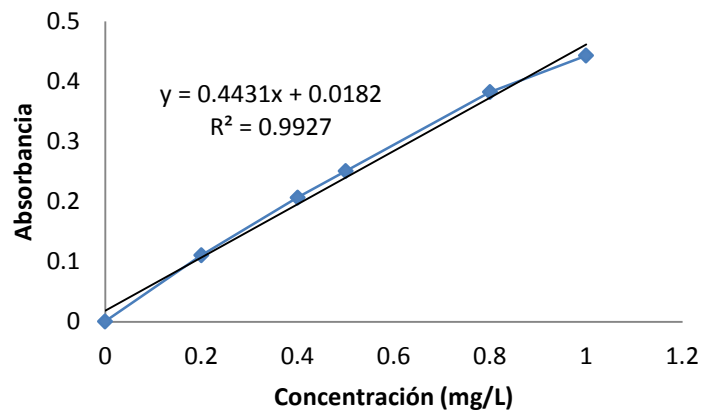


Figura 8.6 Curva de calibración para el Sodio.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

A.3 APÉNDICE C: Tablas de resultados de Pruebas de Jarras – Dosis óptima

Tabla 8.7 Pruebas de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 0-300).

SULFATO DE ALUMINIO								
DOSIS No.	0	50 mg/L	100 mg/L	150 mg/L	200 mg/L	250 mg/L	300 mg/L	
1	675	82	67	57	38	28	18	NTU
Turbidez	674	82	65	56	37	29	17	
Residual	670	82	67	57	37	30	18	
μ	673.00	82.00	66.33	56.67	37.33	29.00	17.67	
%	0.00	87.82	90.14	91.58	94.45	95.69	97.37	
2	675	80	61	55	36	27	19	NTU
Turbidez	670	78	60	55	37	27	17	
Residual	671	77	63	55	36	27	18	
μ	672.00	78.33	61.33	55.00	36.33	27.00	18.00	
%	0.00	88.34	90.87	91.82	94.59	95.98	97.32	
3	665	79	64	62	42	25	10	NTU
Turbidez	664	79	65	60	45	23	11	
Residual	662	79	64	61	47	20	10	
μ	663.67	79.00	64.33	61.00	44.67	22.67	10.33	
%	0.00	88.10	90.31	90.81	93.27	96.58	98.44	
PROM.	669.56	79.78	64.00	57.56	39.44	26.22	15.33	
% PROM	0.00	88.09	90.44	91.40	94.11	96.09	97.71	
DESV. EST.	4.88	1.86	2.40	2.74	4.16	3.11	3.81	

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.8 Pruebas de jarras con semillas de moringa - NaCl (Dosis 0-300).

MORINGA OLEIFERA - NaCl								
DOSIS	0	50	100	150	200	250	300	
No.		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	790	88	50	41	30	27	21	NTU
Turbidez	785	87	53	40	28	25	20	
Residual	787	85	51	38	29	26	19	
μ	787.33	86.67	51.33	39.67	29.00	26.00	20.00	
%	0.00	88.99	93.48	94.96	96.32	96.70	97.46	
2	816	88	50	41	30	27	21	NTU
Turbidez	816	88	50	41	30	27	21	
Residual	816	88	50	41	30	27	21	
μ	816.00	88.00	50.00	41.00	30.00	27.00	21.00	
%	0.00	89.22	93.87	94.98	96.32	96.69	97.43	
3	816	88	50	41	35	27	21	NTU
Turbidez	816	88	50	41	37	27	21	
Residual	816	88	50	41	30	27	21	
μ	816.00	88.00	50.00	41.00	34.00	27.00	21.00	
%	0.00	89.22	93.87	94.98	95.83	96.69	97.43	
PROM.	806.44	87.56	50.44	40.56	31.00	26.67	20.67	
% PROM	0.00	89.14	93.74	94.97	96.16	96.69	97.44	
DESV	14.39	1.01	1.01	1.01	2.96	0.71	0.71	

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.9 Pruebas de jarras con semillas de moringa – Agua desionizada (Dosis 0-300).

MORINGA OLEIFERA - Agua Desionizada								
DOSIS No.	0	50	100	150	200	250	300	
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	816	108	100	88	79	62	59	NTU
Turbidez	822	105	99	90	82	60	57	
Residual	805	104	96	84	77	63	56	
μ	814.33	105.67	98.33	87.33	79.33	61.67	57.33	
%	0.00	87.02	87.92	89.28	90.26	92.43	92.96	
2	816	108	100	88	79	62	59	NTU
Turbidez	816	108	100	88	79	62	59	
Residual	816	108	100	88	79	62	59	
μ	816.00	108.00	100.00	88.00	79.00	62.00	59.00	
%	0.00	86.76	87.75	89.22	90.32	92.40	92.77	
3	816	108	100	88	79	62	59	NTU
Turbidez	816	108	100	88	79	62	59	
Residual	816	108	100	88	79	62	59	
μ	816.00	108.00	100.00	88.00	79.00	62.00	59.00	
%	0.00	86.76	87.75	89.22	90.32	92.40	92.77	
PROM.	815.44	107.22	99.44	87.78	79.11	61.89	58.44	
% PROM	0.00	86.85	87.80	89.24	90.30	92.41	92.83	
DESV	4.39	1.56	1.33	1.56	1.27	0.78	1.13	

Tabla 8.10 Pruebas de jarras con quitosano sintetizado (Dosis 0-300).

QUITOSANO								
DOSIS No.	0	50	100	150	200	250	300	
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	411	90	67	40	110	29	86	NTU
Turbidez	410	88	65	38	115	30	88	
Residual	412	88	66	39	118	29	87	
μ	411.00	88.67	66.00	39.00	114.33	29.33	87.00	
%	0.00	78.43	83.94	90.51	72.18	92.86	78.83	
2	411	91	69	42	100	32	85	NTU
Turbidez	411	93	68	42	99	29	88	
Residual	416	95	69	41	99	31	88	
μ	412.67	93.00	68.67	41.67	99.33	30.67	87.00	
%	0.00	77.46	83.36	89.90	75.93	92.57	78.92	
3	412	95	70	30	108	30	86	NTU
Turbidez	411	93	65	31	105	29	86	
Residual	411	94	66	35	105	28	85	
μ	411.33	94.00	67.00	32.00	106.00	29.00	85.67	
%	0.00	77.15	83.71	92.22	74.23	92.95	79.17	
PROM.	411.67	91.89	67.22	37.56	106.56	29.67	86.56	
% PROM	0.00	77.68	83.67	90.88	74.11	92.79	78.97	
DESV	1.73	2.76	1.86	4.56	6.88	1.22	1.24	

Tabla 8.11 Pruebas de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 0-100).

SULFATO DE ALUMINIO							
DOSIS No.	0	20	40	60	80	100	
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	674	110	95	82	69	52	NTU
Turbidez	675	109	93	84	70	52	
Residual	673	105	93	85	71	52	
μ	674.00	108.00	93.67	83.67	70.00	52.00	
%	0.00	83.98	86.10	87.59	89.61	92.28	
2	670	108	97	83	70	50	NTU
Turbidez	671	112	95	83	68	51	
Residual	667	111	96	84	68	53	
μ	669.33	110.33	96.00	83.33	68.67	51.33	
%	0.00	83.52	85.66	87.55	89.74	92.33	
3	665	112	99	85	68	54	NTU
Turbidez	668	110	99	81	68	52	
Residual	668	110	98	82	68	52	
μ	667.00	110.67	98.67	82.67	68.00	52.67	
%	0.00	83.41	85.21	87.61	89.81	92.10	
PROM.	670.11	109.67	96.11	83.22	68.89	52.00	
% PROM	0.00	83.63	85.66	87.58	89.72	92.24	
DESV	3.41	2.18	2.32	1.39	1.17	1.12	

Tabla 8.12 Pruebas de jarras con moringa – agua desionizada (Dosis 0-100).

MORINGA OLEIFERA - Agua Desionizada						
DOSIS	0	20	40	60	80	100
No.		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	395	121	117	105	117	121
Turbidez	400	121	118	105	117	116
Residual	397	120	130	107	117	117
μ	397.33	120.67	121.67	105.67	117.00	118.00
%	0.00	69.63	69.38	73.41	70.55	70.30
2	395	123	120	107	119	116
Turbidez	397	138	119	107	118	118
Residual	395	131	119	107	117	116
μ	395.67	130.67	119.33	107.00	118.00	116.67
%	0.00	66.98	69.84	72.96	70.18	70.51
3	402	145	118	100	115	118
Turbidez	401	130	119	99	113	121
Residual	400	129	118	97	111	124
μ	401.00	134.67	118.33	98.67	113.00	121.00
%	0.00	66.42	70.49	75.39	71.82	69.83
PROM.	398.00	128.67	119.78	103.78	116.00	118.56
% PROM	0.00	67.67	69.90	73.92	70.85	70.21
DESV	2.78	8.56	3.93	3.99	2.55	2.83

NTU

NTU

NTU

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.13 Pruebas de jarras con quitosano (Dosis 0-100).

QUITOSANO							
DOSIS No.	0	20	40	60	80	100	
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	411	120	102	85	80	63	NTU
Turbidez	410	120	100	89	81	65	
Residual	412	122	102	87	80	64	
μ	411.00	120.67	101.33	87.00	80.33	64.00	
%	0.00	70.64	75.34	78.83	80.45	84.43	
2	411	118	105	86	78	63	NTU
Turbidez	415	121	104	87	79	64	
Residual	416	122	102	86	79	63	
μ	414.00	120.33	103.67	86.33	78.67	63.33	
%	0.00	70.93	74.96	79.15	81.00	84.70	
3	409	119	100	85	82	63	NTU
Turbidez	411	122	102	87	82	61	
Residual	411	121	100	86	82	61	
μ	410.33	120.67	100.67	86.00	82.00	61.67	
%	0.00	70.59	75.47	79.04	80.02	84.97	
PROM.	411.78	120.56	101.89	86.44	80.33	63.00	
% PROM	0.00	70.72	75.26	79.01	80.49	84.70	
DESV	2.28	1.42	1.76	1.24	1.50	1.32	

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.14 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 50:50 (Dosis 0-100).

MORINGA / QUITOSANO (50:50)						
DOSIS	0	20	40	60	80	100
No.		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	475	31	101	48	30	36
Turbidez	477	32	109	45	29	38
Residual	475	30	112	47	29	40
μ	475.67	31.00	107.33	46.67	29.33	38.00
%	0.00	93.48	77.44	90.19	93.83	92.01
2	480	29	123	55	36	40
Turbidez	476	29	120	54	37	41
Residual	475	40	104	55	36	41
μ	477.00	32.67	115.67	54.67	36.33	40.67
%	0.00	93.15	75.75	88.54	92.38	91.47
3	478	34	103	49	34	39
Turbidez	479	33	107	48	33	46
Residual	478	34	105	51	29	42
μ	478.33	33.67	105.00	49.33	32.00	42.33
%	0.00	92.96	78.05	89.69	93.31	91.15
PROM.	477.00	32.44	109.33	50.22	32.56	40.33
% PROM	0.00	93.20	77.08	89.47	93.18	91.55
DESV	1.87	3.43	7.66	3.70	3.36	2.78

NTU

NTU

NTU

Tabla 8.15 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 75:25 (Dosis 0-100).

MORINGA / QUITOSANO (75:25)						
DOSIS	0	20	40	60	80	100
No.		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	475	25	28	24	25	28
Turbidez	482	23	30	23	23	32
Residual	500	24	31	24	24	31
μ	485.67	24.00	29.67	23.67	24.00	30.33
%	0.00	95.06	93.89	95.13	95.06	93.75
2	480	22	27	24	23	27
Turbidez	485	21	28	24	26	28
Residual	482	25	29	24	25	28
μ	482.33	22.67	28.00	24.00	24.67	27.67
%	0.00	95.30	94.19	95.02	94.89	94.26
3	467	20	34	28	29	29
Turbidez	471	19	32	22	23	32
Residual	470	24	37	26	24	33
μ	469.33	21.00	34.33	25.33	25.33	31.33
%	0.00	95.53	92.68	94.60	94.60	93.32
PROM.	479.11	22.56	30.67	24.33	24.67	29.78
% PROM	0.00	95.29	93.59	94.92	94.85	93.78
DESV	10.01	2.19	3.24	1.73	1.94	2.22

NTU

NTU

NTU

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.16 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 25:75 (Dosis 0-100).

MORINGA / QUITOSANO (25:75)						
DOSIS	0	20	40	60	80	100
No.		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	456	136	95	70	62	67
Turbidez	463	140	90	68	59	65
Residual	465	142	97	76	56	69
μ	461.33	139.33	94.00	71.33	59.00	67.00
%	0.00	69.80	79.62	84.54	87.21	85.48
2	461	145	93	72	65	71
Turbidez	462	148	95	77	64	72
Residual	460	151	98	76	64	69
μ	461.00	148.00	95.33	75.00	64.33	70.67
%	0.00	67.90	79.32	83.73	86.04	84.67
3	446	147	100	78	65	75
Turbidez	443	148	193	79	67	73
Residual	445	148	101	81	67	72
μ	444.67	147.67	131.33	79.33	66.33	73.33
%	0.00	66.79	70.46	82.16	85.08	83.51
PROM.	455.67	145.00	106.89	75.22	63.22	70.33
% PROM	0.00	68.16	76.47	83.48	86.11	84.55
DESV	8.63	4.77	32.47	4.32	3.67	3.12

NTU

NTU

NTU

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.17 Pruebas de jarras con sulfato de aluminio (Dosis 100-200).

SULFATO DE ALUMINIO								
DOSIS No.	0	100	120	140	160	180	200	
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	674	52	84	92	62	70	54	NTU
Turbidez	675	50	86	91	62	69	55	
Residual	673	51	87	92	62	69	52	
μ	674.00	51.00	85.67	91.67	62.00	69.33	53.67	
%	0.00	92.43	87.29	86.40	90.80	89.71	92.04	
2	670	50	82	93	64	72	53	NTU
Turbidez	671	45	80	93	67	70	55	
Residual	667	48	78	93	63	73	55	
μ	669.33	47.67	80.00	93.00	64.67	71.67	54.33	
%	0.00	92.88	88.05	86.11	90.34	89.29	91.88	
3	665	53	72	90	68	73	50	NTU
Turbidez	668	52	71	91	63	70	50	
Residual	668	52	69	91	61	71	50	
μ	667.00	52.33	70.67	90.67	64.00	71.33	50.00	
%	0.00	92.15	89.41	86.41	90.40	89.31	92.50	
PROM.	670.11	50.33	78.78	91.78	63.56	70.78	52.67	
% PROM	0.00	92.49	88.25	86.30	90.51	89.44	92.14	
DESV	3.41	2.50	6.72	1.09	2.40	1.56	2.24	

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.18 Pruebas de jarras con moringa (Dosis 100-200).

MORINGA OLEIFERA - Agua Desionizada								
DOSIS No.	0	100 mg/L	120 mg/L	140 mg/L	160 mg/L	180 mg/L	200 mg/L	
1	420	116	108	103	87	84	65	NTU
Turbidez	423	116	107	105	87	85	63	
Residual	419	116	109	105	88	84	62	
μ	420.67	116.00	108.00	104.33	87.33	84.33	63.33	
%	0.00	72.42	74.33	75.20	79.24	79.95	84.94	
2	419	117	111	103	90	83	60	NTU
Turbidez	418	115	113	104	91	82	57	
Residual	418	116	112	105	92	80	62	
μ	418.33	116.00	112.00	104.00	91.00	81.67	59.67	
%	0.00	72.27	73.23	75.14	78.25	80.48	85.74	
3	420	118	111	103	89	83	60	NTU
Turbidez	421	117	109	100	91	72	67	
Residual	419	119	107	101	87	89	70	
μ	420.00	118.00	109.00	101.33	89.00	81.33	65.67	
%	0.00	71.90	74.05	75.87	78.81	80.63	84.37	
PROM.	419.67	116.67	109.67	103.22	89.11	82.44	62.89	
% PROM	0.00	72.20	73.87	75.40	78.77	80.36	85.02	
DESV	1.58	1.22	2.18	1.79	1.96	4.61	3.95	

Tabla 8.19 Pruebas de jarras con quitosano (Dosis 100-200).

QUITOSANO								
DOSIS No.	0	100	120	140	160	180	200	
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	411	60	47	43	26	21	25	NTU
Turbidez	410	58	46	42	26	19	23	
Residual	412	58	47	43	27	20	23	
μ	411.00	58.67	46.67	42.67	26.33	20.00	23.67	
%	0.00	85.73	88.65	89.62	93.59	95.13	94.24	
2	411	58	46	42	25	19	26	NTU
Turbidez	411	57	45	42	25	18	27	
Residual	416	59	46	43	27	20	26	
μ	412.67	58.00	45.67	42.33	25.67	19.00	26.33	
%	0.00	85.95	88.93	89.74	93.78	95.40	93.62	
3	412	59	46	42	25	22	27	NTU
Turbidez	411	60	47	43	23	21	25	
Residual	411	60	47	43	23	21	25	
μ	411.33	59.67	46.67	42.67	23.67	21.33	25.67	
%	0.00	85.49	88.65	89.63	94.25	94.81	93.76	
PROM.	411.67	58.78	46.33	42.56	25.22	20.11	25.22	
% PROM	0.00	85.72	88.74	89.66	93.87	95.11	93.87	
DESV	1.73	1.09	0.71	0.53	1.48	1.27	1.48	

Tabla 8.20 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 50:50 (Dosis 100-200).

MORINGA / QUITOSANO (50:50)								
DOSIS No.	0 mg/L	100 mg/L	120 mg/L	140 mg/L	160 mg/L	180 mg/L	200 mg/L	
1	475	36	34	41	38	34	39	NTU
Turbidez	480	34	109	45	29	38	43	
Residual	476	33	112	47	29	40	43	
μ	477.00	34.33	85.00	44.33	32.00	37.33	41.67	
%	0.00	92.80	82.18	90.71	93.29	92.17	91.26	
2	480	29	123	55	36	40	48	NTU
Turbidez	476	29	120	54	37	41	47	
Residual	475	40	104	55	36	41	30	
μ	477.00	32.67	115.67	54.67	36.33	40.67	41.67	
%	0.00	93.15	75.75	88.54	92.38	91.47	91.26	
3	478	34	103	49	34	39	51	NTU
Turbidez	479	33	107	48	33	46	50	
Residual	478	34	105	51	29	42	42	
μ	478.33	33.67	105.00	49.33	32.00	42.33	47.67	
%	0.00	92.96	78.05	89.69	93.31	91.15	90.03	
PROM.	477.44	33.56	101.89	49.44	33.44	40.11	43.67	
% PROM	0.00	92.97	78.66	89.64	92.99	91.60	90.85	
DESV	2.01	3.36	26.40	4.80	3.64	3.22	6.48	

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.21 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 75:25 (Dosis 100-200).

MORINGA / QUITOSANO (75:25)								
DOSIS	0	100	120	140	160	180	200	
No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	475	28	23	29	31	32	30	NTU
Turbidez	480	27	24	28	32	34	29	
Residual	481	29	24	30	30	33	30	
μ	478.67	28.00	23.67	29.00	31.00	33.00	29.67	
%	0.00	94.15	95.06	93.94	93.52	93.11	93.80	
2	450	26	22	30	33	33	33	NTU
Turbidez	435	26	25	28	34	35	29	
Residual	430	29	24	31	31	36	34	
μ	438.33	27.00	23.67	29.67	32.67	34.67	32.00	
%	0.00	93.84	94.60	93.23	92.55	92.09	92.70	
3	441	20	34	28	29	29	39	NTU
Turbidez	432	19	32	22	23	32	37	
Residual	429	24	37	26	24	33	41	
μ	434.00	21.00	34.33	25.33	25.33	31.33	39.00	
%	0.00	95.16	92.09	94.16	94.16	92.78	91.01	
PROM.	450.33	25.33	27.22	28.00	29.67	33.00	33.56	
% PROM	0.00	94.38	93.92	93.78	93.41	92.66	92.51	
DESV	22.24	3.67	5.54	2.69	3.81	2.00	4.53	

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.22 Pruebas de jarras con moringa:quitosano 75:25 (Dosis 100-200).

MORINGA / QUITOSANO (25:75)								
DOSIS	0	100	120	140	160	180	200	
No.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
1	450	67	61	49	37	34	26	NTU
Turbidez	463	69	63	48	38	32	30	
Residual	455	63	59	49	33	33	27	
μ	456.00	66.33	61.00	48.67	36.00	33.00	27.67	
%	0.00	85.45	86.62	89.33	92.11	92.76	93.93	
2	462	68	58	50	39	33	28	NTU
Turbidez	465	69	57	51	41	36	27	
Residual	460	69	54	53	45	38	27	
μ	462.33	68.67	56.33	51.33	41.67	35.67	27.33	
%	0.00	85.15	87.82	88.90	90.99	92.29	94.09	
3	446	65	58	47	38	32	25	NTU
Turbidez	443	66	61	46	41	34	24	
Residual	445	65	64	64	55	44	39	
μ	444.67	65.33	61.00	52.33	44.67	36.67	29.33	
%	0.00	85.31	86.28	88.23	89.96	91.75	93.40	
PROM.	454.33	66.78	59.44	50.78	40.78	35.11	28.11	
% PROM	0.00	85.30	86.91	88.82	91.02	92.27	93.81	
DESV	8.54	2.17	3.13	5.38	6.26	3.86	4.43	

A.4 APÉNDICE D: Tablas de resultados de Pruebas de Jarras – pH óptimo

Tabla 8.23 Prueba de jarras con sulfato de aluminio.

SULFATO DE ALUMINIO - DOSIS 100 mg/L							
Réplicas	pH Inicial	7.926	5	6	7	8	9
No.	pH Final	7.631	4.75	5.81	6.76	7.64	8.5
No.	Turb. Inicial		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	677	52	39	18	27	54	68
Turbidez	675	52	41	21	28	53	67
Residual	673	52	39	23	28	54	66
μ	675.00	52.00	39.67	20.67	27.67	53.67	67.00
%	0.00	92.30	94.12	96.94	95.90	92.05	90.07
2	670	50	40	20	24	52	71
Turbidez	670	51	40	19	27	51	74
Residual	670	53	40	19	28	54	74
μ	670.00	51.33	40.00	19.33	26.33	52.33	73.00
%	0.00	92.34	94.03	97.11	96.07	92.19	89.10
3	665	54	34	19	23	56	59
Turbidez	665	52	32	17	23	52	62
Residual	665	52	35	19	22	42	57
μ	665.00	52.67	33.67	18.33	22.67	50.00	59.33
%	0.00	92.08	94.94	97.24	96.59	92.48	91.08
PROM.	670.00	52.00	37.78	19.44	25.56	52.00	66.44
% PROM	0.00	92.24	94.36	97.10	96.19	92.24	90.09

Tabla 8.24 Prueba de jarras con moringa.

MORINGA OLEIFERA - Agua Desionizada - DOSIS 200 mg/L							
Réplicas	pH Inicial	7.94	5	6	7	8	9
No.	pH Final	7.74	4.91	5.87	6.93	7.75	8.62
No.	Turb. Inicial		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	420	65	68	64	66	65	71
Turbidez	423	63	70	62	66	63	72
Residual	419	62	70	67	63	62	71
μ	420.67	63.33	69.33	64.33	65.00	63.33	71.33
%	0.00	84.94	83.52	84.71	84.55	84.94	83.04
2	430	60	67	65	67	60	70
Turbidez	445	57	66	67	68	57	70
Residual	437	62	65	65	65	53	70
μ	437.33	59.67	66.00	65.67	66.67	56.67	70.00
%	0.00	86.36	84.91	84.98	84.76	87.04	83.99
3	445	60	69	63	58	56	73
Turbidez	421	67	73	63	56	67	68
Residual	405	70	75	63	61	70	78
μ	423.67	65.67	72.33	63.00	58.33	64.33	73.00
%	0.00	84.50	82.93	85.13	86.23	84.82	82.77
PROM.	427.22	62.89	69.22	64.33	63.33	61.44	71.44
% PROM	0.00	85.27	83.78	84.94	85.18	85.60	83.27

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.25 Prueba de jarras con quitosano.

QUITOSANO - DOSIS 180 mg/L							
Réplicas	pH Inicial	8.1	5	6	7	8	9
No.	pH Final	7.61	4.59	5.74	6.68	7.61	8.52
	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	411	60	47	43	26	21	31
Turbidez	410	58	46	42	26	15	32
Residual	412	58	47	43	24	17	29
μ	411.00	58.67	46.67	42.67	25.33	17.67	30.67
%	0.00	85.73	88.65	89.62	93.84	95.70	92.54
2	411	58	46	42	23	19	32
Turbidez	411	57	45	42	25	23	34
Residual	416	59	46	43	26	20	26
μ	412.67	58.00	45.67	42.33	24.67	20.67	30.67
%	0.00	85.95	88.93	89.74	94.02	94.99	92.57
3	412	59	46	42	28	22	33
Turbidez	411	60	47	43	31	21	37
Residual	411	60	47	43	29	19	38
μ	411.33	59.67	46.67	42.67	29.33	20.67	36.00
%	0.00	85.49	88.65	89.63	92.87	94.98	91.25
PROM.	411.67	58.78	46.33	42.56	26.44	19.67	32.44
% PROM	0.00	85.72	88.74	89.66	93.58	95.22	92.12

Tabla 8.26 Prueba de jarras con M:Q 50:50.

MORINGA / QUITOSANO (50:50) - DOSIS 20 mg/L							
Réplicas	pH Inicial	8.19	5	6	7	8	9
No.	pH Final	7.87	4.89	5.933	6.92	7.62	8.47
	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	483	31	36	45	33	31	43
Turbidez	477	32	33	47	34	32	41
Residual	475	30	42	48	32	29	40
μ	478.33	31.00	37.00	46.67	33.00	30.67	41.33
%	0.00	93.52	92.26	90.24	93.10	93.59	91.36
2	480	29	41	46	32	29	40
Turbidez	487	29	46	48	39	29	40
Residual	473	40	39	51	45	27	40
μ	480.00	32.67	42.00	48.33	38.67	28.33	40.00
%	0.00	93.19	91.25	89.93	91.94	94.10	91.67
3	470	34	32	43	34	34	39
Turbidez	476	33	37	35	38	32	38
Residual	477	34	44	32	32	34	45
μ	474.33	33.67	37.67	36.67	34.67	33.33	40.67
%	0.00	92.90	92.06	92.27	92.69	92.97	91.43
PROM.	477.56	32.44	38.89	43.89	35.44	30.78	40.67
% PROM	0.00	93.21	91.86	90.81	92.58	93.55	91.48

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Tabla 8.27 Prueba de jarras con M:Q 75:25.

MORINGA / QUITOSANO (75:25) - DOSIS 20 mg/L							
Réplicas	pH Inicial	8.05	5	6	7	8	9
No.	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	489	25	41	32	27	19	34
Turbidez	482	23	40	30	26	22	35
Residual	500	24	39	33	24	23	35
μ	490.33	24.00	40.00	31.67	25.67	21.33	34.67
%	0.00	95.11	91.84	93.54	94.77	95.65	92.93
2	474	22	39	37	27	22	36
Turbidez	470	21	44	38	27	22	33
Residual	482	25	41	36	22	19	28
μ	475.33	22.67	41.33	37.00	25.33	21.00	32.33
%	0.00	95.23	91.30	92.22	94.67	95.58	93.20
3	495	20	47	38	23	21	39
Turbidez	482	19	45	39	29	18	43
Residual	477	24	46	39	28	19	41
μ	484.67	21.00	46.00	38.67	26.67	19.33	41.00
%	0.00	95.67	90.51	92.02	94.50	96.01	91.54
PROM.	483.44	22.56	42.44	35.78	25.89	20.56	36.00
% PROM	0.00	95.33	91.22	92.59	94.64	95.75	92.56

Tabla 8.28 Prueba de jarras con M:Q 25:75.

MORINGA / QUITOSANO (25:75) - DOSIS 200 mg/L							
Réplicas	8.2	8.2	5	6	7	8	9
No.	Turb. Inicial	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	450	26	64	47	24	26	32
Turbidez	444	30	66	48	21	22	33
Residual	443	27	59	46	29	27	37
μ	445.67	27.67	63.00	47.00	24.67	25.00	34.00
%	0.00	93.79	85.86	89.45	94.47	94.39	92.37
2	462	28	57	53	28	23	34
Turbidez	475	27	59	53	27	27	38
Residual	477	27	54	55	28	21	38
μ	471.33	27.33	56.67	53.67	27.67	23.67	36.67
%	0.00	94.20	87.98	88.61	94.13	94.98	92.22
3	481	25	62	57	26	25	44
Turbidez	462	24	64	59	29	22	37
Residual	453	39	59	51	29	28	28
μ	465.33	29.33	61.67	55.67	28.00	25.00	36.33
%	0.00	93.70	86.75	88.04	93.98	94.63	92.19
PROM.	460.78	28.11	60.44	52.11	26.78	24.56	35.67
% PROM	0.00	93.90	86.86	88.70	94.19	94.67	92.26

9. REFERENCIAS

- Arboleda, J. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. 3ª Edición, Ed. McGraw-Hill Interamericana.
- Arreguín, C.; Mejía, M. (2006) Water Quality Management in Mexico. In: Biswas AK and Tortajada C (eds.) Water Resources Development and Management. Springer, Berlin & Heidelberg. 119–136.
- Barceló Q. I. D. (2000) [a]. Estudio de la Movilidad de Ca, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, y Zn en sedimentos de la presa José Antonio Alzate *en el Estado de México*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México
- Bergamasco, R.; Bouchard, C.; Vieira, F.; Hespanhol, M.; Fagundes-Klenc, M. (2009). An application of chitosan as a coagulant/flocculant in a microfiltration process of natural water. *Desalination* 245 (2009) 205-213.
- Bina, B.; Mehdinejad M.; Dalhammer, G.; Rajarao, G.; Nikaeen M.; Movahedian, H. (2010). Effectiveness of *Moringaoleifera* Coagulant Protein as Natural Coagulant aid in Removal of Turbidity and Bacteria from Turbid Waters. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 67.
- Bolto, B.; Gregory, (2007) Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Res.* 41(11). 2301 -2324.
- Chen, G. (2004) Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Sep. Purif. Technol.* 38 (1) 11–41.
- Crapper, D.; Krishnan, S.; Dalton, A. (1973) Brain aluminum distribution in Alzheimer's disease and experimental neurofibrillary degeneration. *Sci. Tech. Froid* 180(4085), 511-513.
- Crini, G. (2005). Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. *Prog. Polym. Sci.* Vol.30, (38–70)
- D.O.F, 1996. 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. Disponible en: <http://www.economia-noms.gob.mx/>.
- Díaz, A.; Rincón, N.; Escorihuela, A.; Fernández, N.; Chacín, E.; Forster, C.(1999). A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela. *Process Biochem* 1999;35:391-5.
- Duke, A. (1983). *Moringa oleifera* Lam, Handbook of Energy Crops. Disponible en: http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Moringa_oleifera.html. (Último acceso: octubre 2013).

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Elwakeel, K. (2010) Environmental Application of Chitosan Resins for the Treatment of Water and Wastewater: A Review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 31:273–288, 2010

Fabris, R.; Chow, C.; Drikas, M. (2010). Evaluation of chitosan as a natural coagulant for drinking water treatment. *Water Science & Technology* (61.8).

Ferreira, R.; Napoleão, T.; Santos, A.; Sa R.; Carneiro-da-Cunha, M.; Morais, M.; Silva-Lucca, R.; Oliva, M.; Coelho, L.; Paiva, P. (2011). Coagulant and antibacterial activities of the water-soluble seed lectin from *Moringaoleífera*. *Letters in Applied Microbiology* ISSN: 0266-8254.

George, D. B., S. G. Berk, V. D. Adams, R. S. Ting (1995) Toxicity of alum sludge extracts to a freshwater alga, protozoa, fish, an marine bacterium. *Ach. Environ. Contam. Toxicol.* 29, 149-158.

Ghebremichael, K.; Abaliwano, J.; Amy G. (2009). Combined natural organic and synthetic inorganiccoagulants for surface water treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*. 58.4

Habibian, M.; O’Melia, C. (1976) Particles, polymer, and performance in filtration, *J. Environ. Eng. ASCE* 10. 567–582.

Harris, D. (2007) *Quantitative Chemical Analysis* (6a Ed.). W.H.Freeman and Company, New York & Basingstoke. 1–744.

Haydar, S.; Anwae, A. (2009) Coagulation-flocculation studies of tannery wastewater using cationic polymers as a replacement of metal salts. *WaterSci. Technol.* 59 (2) 381–391.

Hernández, A. (1990). *Depuración de aguas residuales*. Cap 6, 369-394. Ed. Paraninfo, S. España.

Jahn, S.A.A. (1989). *Moringa oleifera* for food and water purification - selection of clones and growing of annual short stem. *Entwicklung + Landlicher Raum* 23 (4), 22–25.

Jiménez, I. (2009). *Espectroscopía de Infrarrojo*. Cap. 4, 7-8. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú

Kaewdannetra, P.; García, G.; James, A.; Chiu, T. (2009) Influence of pH and $Al_2(SO_4)_3$ on the stability of whey suspensions. *Sep. Purif. Technol.* 67 364–368.

Kossori, R.; Villaume, C.; Boustani, E.; Sauvaire, Y.; Mejean, L. (1998) Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus indica* sp). *Plant Food Hum Nutr* 1998;52:263-70.

Krishnan, S. S., D. R. McLachlan, B. Krishnan, S. S. (1988). Aluminum toxicity to the brain. *Sci. Total Environ.* 71(1), 59-64.

Lédo, P.; Lima, R.; Paulo, J.; Duarte, M. (2009). Estudio Comparativo de Sulfato de Aluminio y Semillasde *Moringa oleifera* para la depuración de aguas con baja turbiedad. *Información Tecnológica* Vol. 20(5), 3-12.

Martínez, S. (2008). Adsorción de Cu (ii), Cd (ii) y Co (ii) como contaminantes disueltos en sistemas acuosos mediante quitosano obtenido a partir de la *daphniapulex*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias e Ingeniería Ambientales. Universidad Autónoma Metropolitana. México.

Miller, R. G., F. C. Kopfter, K. C. Kelty, J. A. (1984). The occurrence of aluminum in drinking water. J. Am. Water Works Assoc. 76, 84-91.

Miller, S.; Fugate, E.; Craver, V.; Smith, J.; Zimmerman, J. (2008) . Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. Environ Sci Technol 2008;42:4274-9.

Murillo, J. (2009) Turbidez y sólidos en suspensión de las aguas de escorrentía susceptibles de ser utilizadas en la recarga artificial del acuífero granular profundo subyacente a la ciudad de San LuisPotosí (México). Boletín Geológico y Minero 120 (2) 169–184.

Muthuraman G.; Sasikala, S. (2013). Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. JIEC-1516; No. of Pages 5

Muyibi, S.A.; Alfugara, A.M.S. (2003). Treatment of surface water with *Moringa oleifera* seed extract and alum – a comparative study using a pilot scale water treatment plant. International Journal of Environmental Studies 60 (6), 617– 626.

Muyibi, S.A.; Evison, L.M. (1996). Coagulation of turbid water and softening of hard water with *Moringa oleifera* seeds. International Journal of Environmental Studies 49 (3), 247–259.

Nakata, K.; Kurane, R. (1999). Production of an extracellular polysaccharide bioflocculant by *Klebsiella pneumoniae*. Biosci Biotechnol Biochem 1999;63:2064-8.

Ndabigengesere, A; Narasiah, S. (1997) Quality of water treated by coagulation using moringa oleifera seeds. Wat. Res. Vol. 32, No. 3, pp. 781±791.

Ndabigengesere, I.; Narasiah, S.; Talbot, B. (1994). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *moringa oleifera*. War. Res. Vol. 29, No. 2, Pp. 703-710.

Nkurunziza, T.; Nduwayezu, J.B.; Banadda, E.N.; Nhapi, I. (2009). The effect of turbidity levels and *Moringa oleifera* concentration on the effectiveness of coagulation in water treatment. Water Science and Technology 59, 1551–1558.

Okuda, T.; Baes, U.; Nishijima, W.; Okada, M. (1999). Improvement of extraction method of coagulation active components from moringa oleifera seed. Wat. Res. Vol. 33, No. 15, pp. 3373±3378, 1999

Ortiz, M. (2005) La experiencia de Holanda y Alemania en el uso de cargos por vertimientos de aguas residuales como instrumento para el control de la contaminación

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

hídrica. Elementos para decidir los parámetros a ser tenidos en consideración. *Economía y Desarrollo* 4 (1) 55–87.

Ozacar, M.; Sengil, A. (2003) Evaluation of tannin biopolymer as a coagulant aid for coagulation of colloidal particles. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 229(1–3), 85–96.

Pacala, A.; Vlaicu, I.; Radovan, C. (2009) Application of several aluminiumprehydrolysed coagulants in surface water treatment for potabilization. *Environ. Eng. Manage. J.* 8 (6) 1371–1376

Panizza, A. (2006). Evaluación de dos alternativas de tratamiento para lodos con sulfato de aluminio provenientes de la potabilización del agua. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias e Ingeniería Ambientales. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. México.

Panizza, A.; Aldama, A.; Chacalo, A.; Vaca, M.; Grabinsky, J.; Márquez, C.; Durán, C. (2008). Evaluación del compost elaborado a partir de lodos con alto contenido de sulfato de aluminio. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4 (3): 342-348.

Pillai, V.; Divakaran, R.; (2002). Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants. *Water Res.* 36. 2414.

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* 9 (2012):2346-2352.

Pritchard, M.; Craven, T.; Mkandawire, T.; Edmondson, A. S.; O'Neill, J. (2010). A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. *Physics and Chemistry of the Earth* 35 (2010) 798–805.

Quecholac, X. (2008). Evaluación de la movilidad de Al, Cu, Co, Mn, Ni, y Fe en lodos de tratamiento y de sedimentos de un cuerpo acuático a través de la metodología de especiación química. Proyecto terminal para obtener el grado de Ingeniero Ambiental. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. México.

Ramalho, R. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Cap. 1, 8-11. Editorial Reverté. España.

Rapp, L.; Bishop, K. (2009) Surface water acidification and critical loads: exploring the F-factor. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 48 (3)673–686.

Rodríguez, J.; Lugo, I.; Rojas, A.; y Malaver, C. (2007) Evaluation of the coagulation process for designing a water treatment plant. *ThresholdScientific*. Manuela BeltranUniversityFoundation, Bogota. 8–16.

Rodríguez S.; Muñoz, R.; García, O.; Fernández, E. (2005). Empleo de un producto Coagulante Natural para Clarificar Agua. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, Vol. 36, No. Especial, 2005.

“Uso de materiales naturales para mejorar la coagulación-floculación y la velocidad de sedimentación de lodos provenientes de aguas municipales y agrícolas”

Rojas, R.; Mendoza, L.(2012). Use of calcium sulphatedihydrate as an alternative to the conventional use of aluminiumsulphate in the primary treatment of wastewater. *Water SA* Vol. 38 No. 5 October 2012.

Rosas de Alva, S; Barceló, I.D., A.L. Bussy, A.L., López, E. (2010). Propuesta técnica sobre el tratamiento del influente de la presa José Antonio Alzate a través un sistema lagunar aerobio. *Ing. invest. y tecnol.* vol.11 no.1 México ene./mar. 2010.

Saenz, C.; Sepúlveda, E.; Matsuhira, B. (2004). *Opuntia* spp mucilage' s: a functional component with industrial perspectives. *J Arid Environ* 2004;57:275-90.

Santos, A.; Paiva, P.; Teixeira, J.; Brito, A.; Coelho,L.; Nogueira, R.; (2011) Coagulant propertiesof *Moringaoleifera* protein preparations: application tohumic acids removal. *Environ Technol.* doi: 10.1080.

Sarkar, B.; Chakrabarti, P. P.; Vijaykumar, A.; Kale, V. (2006). Wastewater treatment in dairy industries - possibility of reuse. *Desalination* 195, 141–152.

Simina, S.; Costache, C.; Ruxandu, V.; Balas, M.; Stefan, M. Comparative study on surface water treatment usingaluminiumsulphate and polyaluminium chlorides as coagulantreagents. *Environ. Eng. Manage. J.* 8 (4) 859–863.

Sotero Santos, R. B., O. Rocha & J. Povinelli. 2007. Toxicity of ferric chloride sludge to aquatic organisms. *Chemosphere* 68(4), 628-636.

Sutherland, J.P.; Folkard, G.K.; Grant, W.D., (1990). Natural coagulants for appropriate water treatment: a novel approach. *Waterlines* 8 (4).

Sutherland, J.P. (1994). *Moringa oleifera* as a natural coagulant, affordable water supply as sanitation. In: 20th WEDC Conference.

Vázquez, O. (1994). Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de agua superficiales. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

Yan, M.; Wang, D.; Ni, J.; Qu, J.; Yan, Y.; Chow, W. (2008) Effect of polyaluminium chloride on enhanced softening for the typical organic-polluted high hardness North-China surface waters. *Sep. Purif. Technol.* 62 401–406.

Yin, C. (2011). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochem.* 45 (9):1437-1444.

Zeta-Meter, Inc. (1993). Potencial Zeta, La interacción de los coloides.

Zonoozi, M.; Moghaddam, M.; Arami, M. (2011). Study on the removal of acid dyes using chitosan as a natural coagulant/coagulant aid. *Water Science & Technology* 9 (63.3).