



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA AMBIENTAL - RESIDUOS SÓLIDOS

**MÉTODO ALTERNATIVO PARA TRATAR LIXIVIADOS MADUROS MEDIANTE
EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON MUCÍLAGO DE**
Opuntia ficus-indica

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA
ALFREDO MARTÍNEZ CRUZ

TUTOR
DRA. MARIA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR
DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. IGNACIO MONJE RAMÍREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Rosa María Ramírez Zamora

Secretario: Dra. Georgina Fernández Villagómez

Vocal: Dra. Alma Concepción Chávez Mejía

1^{er}. Suplente: Dr. Ignacio Monje Ramírez

2^{do}. Suplente: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Lugar donde se realizó la tesis: Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que cuenta con la certificación ISO 9001-2008, otorgada por el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C (IMNC) con registro RSGC 960 de fecha 11 de enero de 2016, vigente al 11 de enero de 2019.

TUTOR DE TESIS

Dra. María Neftalí Rojas Valencia

“Los límites que tenemos existen solamente en nuestra mente.

Démonos la oportunidad de ir más allá de lo que los demás creen que podemos, y lo más importante, de lo que nosotros mismos creemos que somos capaces de hacer.”

DEDICATORIA

A Dios, por todo lo que me ha dado.

A mi Padre, porque sé que donde él se encuentra está feliz y orgulloso de cada uno de mis logros y esfuerzos; además, tengo la seguridad de que él me manda siempre buenos deseos y me sigue apoyando en mis momentos de flaqueza y debilidad. Gracias.

A mi Madre, porque sin su apoyo sería imposible ser la persona que soy hoy en día, gracias por todo el amor incondicional que ha compartido siempre conmigo.

A mi Hermana Hilda y Sobrina Mariana (Pini), por ser parte de mi núcleo familiar. Es bueno saber que me apoyan y que puedo apoyarlas siempre.

A mi Esposa Laura, compañera de aventuras, en las buenas y en las malas. Gracias por darme la oportunidad de compartir una vida siempre juntos.

A cada uno de mis Profesores, que compartieron sus conocimientos y que me permitieron lograr una meta más en mi vida.

A mis compañeros de Maestría, por permitirme compartir momentos de estudio y diversión.

AGRADECIMIENTOS

A mi Tutora, la Dra. María Neftalí Rojas Valencia, por toda la asesoría que me brindó durante estos cuatro semestres. Sin todo su apoyo hubiera sido imposible la realización de esta tesis. Gracias por sus incontables consejos.

A los integrantes de mi Comité Tutorial, por todas sus asesorías que me permitieron enriquecer este trabajo de tesis.

A la Dra. Georgina Fernández Villagómez, por su apoyo con relación a los costos de disposición final de los lodos.

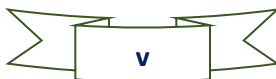
A la Dra. María de Fátima Nunes de Carvalho, por todo el apoyo que me brindó durante mi Estancia de Investigación en el Instituto Politécnico de Beja, en Portugal.

Al Dr. Agustín Ortega Esquinca y a la Dra. María Conceição Fernandes, por permitirme ser parte de su familia durante mi estancia en Portugal.

A la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM, por sus servicios prestados en la realización del presente trabajo de tesis.

A SNF Floerger de México, por las muestras de productos facilitadas para la realización de los experimentos de esta investigación.

AL CONACYT, por otorgarme la beca que me permitió realizar los estudios de Maestría.



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Aportaciones del material orgánico e inorgánico de los RSU en un relleno sanitario	15
Tabla 2.2. Clasificación de lixiviados de acuerdo con varios autores	21
Tabla 2.3. Procesos de tratamiento usados en efluentes industriales	24
Tabla 2.3. Procesos de tratamiento usados en efluentes industriales (continuación)	25
Tabla 2.4. Sistemas de tratamientos de lixiviados	25
Tabla 2.5. Ejemplos de los diferentes tipos de coagulantes	29
Tabla 2.6. Clasificación de floculantes	34
Tabla 2.7. Índice de Willcomb para caracterización de flóculos	35
Tabla 2.8. Normativa en México relativa a aguas residuales, sitios de disposición final y residuos peligrosos.....	41
Tabla 2.9. Comparación de límites de descarga de lixiviados en el ámbito internacional.	42
Tabla 3.1. Caracterización IIUNAM de los lixiviados en las cuatro etapas del RSBP	44
Tabla 3.2. Caracterización de los lixiviados en las cuatro etapas del RSBP	44
Tabla 3.2. Caracterización de los lixiviados en las cuatro etapas del RSBP (continuación)	45
Tabla 3.3. Valores mínimos y máximos de parámetros característicos en la etapa III del RSBP	46
Tabla 3.4. Composición química del nopal fresco	49
Tabla 3.5. Composición química de pencas de nopal en distintas edades.	49
Tabla 3.6. Investigaciones sobre el tratamiento de lixiviados con procesos de coagulación-floculación usando coagulantes químicos	51
Tabla 3.7. Clasificación de polímeros sintéticos de acuerdo con su peso molecular	52
Tabla 3.8. Coagulantes orgánicos sintéticos usados en el tratamiento de agua.....	53
Tabla 3.9. Investigaciones relacionadas a coagulantes orgánicos naturales.....	55
Tabla 3.10. Investigaciones relacionadas a la estructura y composición del mucílago de nopal.....	56
Tabla 3.11. Presencia de monómeros y peso molecular en mucílago de <i>Opuntia ficus-sp.</i> , según diferentes estudios	57
Tabla 3.12. Composición química del mucílago de nopal	58
Tabla 3.13. Investigaciones sobre el uso de mucílago de nopal como coagulante.....	58
Tabla 4.1. Datos representativos de las cuatro etapas del RSBP	72
Tabla 4.2. Cárcamos de lixiviados, etapa III del RSBP	72
Tabla 4.3. Referencias normativas para la caracterización de lixiviados	75
Tabla 4.4. Equipos usados en esta investigación para la caracterización de lixiviados	76

Tabla 4.5. Productos usados en la experimentación etapa I	80
Tabla 4.6. Condiciones de experimentación etapa I	81
Tabla 4.7. Soluciones madre usadas en la experimentación etapa I.....	80
Tabla 4.8. Condiciones del proceso de coagulación-floculación en la experimentación etapa I	81
Tabla 4.9. Productos usados en la experimentación etapa II	82
Tabla 4.10. Condiciones de experimentación etapa II	83
Tabla 4.11. Soluciones madre usadas en la experimentación etapa II.....	82
Tabla 4.12. Condiciones del proceso de coagulación-floculación en la experimentación etapa II	83
Tabla 4.13. Productos usados en la experimentación etapa III	84
Tabla 4.14. Condiciones de experimentación, experimentación etapa III.....	85
Tabla 4.15. Condiciones del proceso de coagulación-floculación en la experimentación etapa III.....	85
Tabla 5.1. Resultados obtenidos en los procedimientos evaluados de extracción de mucílago de nopal	91
Tabla 5.2. ANOVA de gramos de mucílago de nopal extraídos en cada uno de procedimientos evaluados	92
Tabla 5.3. Resultados de la caracterización del mucílago de nopal obtenido para cada procedimiento evaluado.....	93
Tabla 5.4. ANOVA del contenido de carbohidratos obtenidos en cada procedimiento de extracción evaluado.....	93
Tabla 5.5. Fechas y volúmenes muestreados de lixiviados en la etapa III del RSBP	95
Tabla 5.6. Resultado de la caracterización de los lixiviados crudos	96
Tabla 5.7. Resultados del análisis de variables por el modelo de superficie de respuesta.....	97
Tabla 5.8. Modelos estadísticos que describen los datos generados en la experimentación	97
Tabla 5.9. Condiciones óptimas de operación en cada etapa de experimentación para la máxima remoción de DQO.....	98
Tabla 5.10. Disociación de compuestos con el modelo de MO a diferentes valores de pH	101
Tabla 5.11. Calificaciones asignadas en relación con los Intervalos de costos del aspecto económico de la Matriz de Decisión Multicriterio.....	127
Tabla 5.12. Resultados de la factibilidad técnica por el método de Matriz de Decisión Multicriterio para las nueve mejores condiciones de coagulante-floculante.....	128
Tabla 5.13. Resultados de la factibilidad económica por el método de Matriz de Decisión Multicriterio para las nueve mejores condiciones de coagulante-floculante.....	129
Tabla 5.14. Resultados de la factibilidad técnica por el método de Matriz de Decisión Multicriterio para las condiciones óptimas en los coagulantes evaluados	130

Tabla 5.15. Resultados de la factibilidad económica por el método de Matriz de Decisión Multicriterio para las condiciones óptimas en los coagulantes evaluados	130
Tabla 5.16. Resultados totales de la Matriz de Decisión Multicriterio para las condiciones óptimas en las tres etapas de experimentación	131
Tabla 9.1. Resultados de la experimentación etapa I.....	146
Tabla 9.1. Resultados de la experimentación etapa I (continuación).....	147
Tabla 9.1. Resultados de la experimentación etapa I (continuación).....	148
Tabla 9.2. Resultados de la experimentación etapa II.....	149
Tabla 9.2. Resultados de la experimentación etapa II (continuación).....	150
Tabla 9.2. Resultados de la experimentación etapa II (continuación).....	151
Tabla 9.3. Resultados de la experimentación etapa III.....	152
Tabla 9.3. Resultados de la experimentación etapa III (continuación).....	153
Tabla 9.3. Resultados de la experimentación etapa III (continuación).....	154
Tabla 9.4. Datos ingresados al programa Minitab, experimentación etapa I	155
Tabla 9.5. Análisis de variables y coeficientes, experimentación etapa I	155
Tabla 9.6. Datos de optimización de porcentaje de remoción de DQO, experimentación etapa I	156
Tabla 9.7. Análisis de varianza, experimentación etapa I.....	156
Tabla 9.8. Datos ingresados al programa Minitab, experimentación etapa II	157
Tabla 9.9. Análisis de variables y coeficientes, experimentación etapa II	157
Tabla 9.10. Datos de optimización de porcentaje de remoción de DQO, experimentación etapa II	158
Tabla 9.11. Análisis de varianza, experimentación etapa I.....	158
Tabla 9.12. Datos ingresados al programa Minitab, experimentación etapa III.....	159
Tabla 9.13. Análisis de variables y coeficientes, experimentación etapa III	159
Tabla 9.14. Datos de optimización de porcentaje de remoción de DQO, experimentación etapa III.....	160
Tabla 9.15. Análisis de varianza, experimentación etapa III.....	160
Tabla 9.16. Relación de costos de productos químicos e insumos usados en la evaluación económica de los coagulantes y floculantes evaluados	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Gráfica en porcentaje de disposición final de residuos sólidos urbanos en México	10
Figura 2.2. Gráfica del número de rellenos sanitarios en México	12
Figura 2.3. Aportación de las fases de descomposición de RSU en la formación de lixiviados	16
Figura 2.4. Comportamiento de la formación de los principales componentes de los lixiviados en relación con sus fases de formación	17
Figura 2.5. Doble capa presente en los coloides.....	27
Figura 2.6. Colapso de la nube de iones en la coagulación de coloides	28
Figura 2.7. Fases del proceso de coagulación.....	30
Figura 2.8. Mecanismo de interacción entre coloides y una poliamina.....	31
Figura 2.9. Mecanismo de interacción entre coloides y polímeros orgánicos naturales solubles	32
Figura 2.10. Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en el proceso de coagulación	35
Figura 2.11. Equipo de prueba de jarras.....	38
Figura 3.1. Producción nacional de nopal en México	48
Figura 3.2. Fotografía de residuos orgánicos generados en el Centro de Acopio del Nopal, Milpa Alta, Ciudad de México.....	50
Figura 3.3. Estructura química de algunos biopolímeros.....	54
Figura 3.4. Estructura química del mucílago de nopal.....	56
Figura 4.1. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada	60
Figura 4.2. Fotografía de nopales que se usaron en la investigación.....	62
Figura 4.3. Diagrama de bloques de los procesos de extracción de mucílago de nopal utilizados en la investigación.....	63
Figura 4.4. Fotografías de las etapas de los procesos de extracción de mucílago de nopal	64
Figura 4.5. Procedimiento para la determinación del contenido de humedad en las muestras de mucílago de nopal.....	65
Figura 4.6. Procedimiento para la determinación de la proteína cruda en las muestras de mucílago de nopal	67
Figura 4.7. Procedimiento para la determinación de los lípidos crudos en las muestras de mucílago de nopal	68
Figura 4.8. Procedimiento para la determinación de fibra cruda en las muestras de mucílago de nopal.....	69
Figura 4.9. Procedimiento para la determinación de cenizas en las muestras de mucílago de nopal.....	70
Figura 4.10. Ubicación del relleno sanitario Bordo Poniente	71

Figura 4.11. Punto de muestreo en la Etapa III del RSBP	73
Figura 4.12. Procedimiento de muestreo de lixiviados en la Etapa III del RSBP	74
Figura 4.13. Fotografía representativa de las pruebas de jarras desarrolladas en la Investigación.....	78
Figura 5.1. Fotografía de mucílago de nopal obtenido en la Investigación	90
Figura 5.2. Gráfica de intervalos de porcentaje de carbohidratos obtenidos en los procedimientos evaluados de extracción de mucílago de nopal.....	94
Figura 5.3. Fotografía de lixiviados muestreados en la Etapa III del RSBP	95
Figura 5.4. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentraciones de coagulante y floculante, experimentación etapa I. pH a 6.0	99
Figura 5.5. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentraciones de coagulante y pH, experimentación etapa I. Concentración del floculante de 0.1 g/L	101
Figura 5.6. Gráfica de interacción para la media del porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa I.....	103
Figura 5.7. Gráfica de efectos principales para las medias de porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa I.....	104
Figura 5.8. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentraciones de coagulante y bentonita, experimentación etapa III. pH de 6.0	105
Figura 5.9. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentración de coagulante y pH, experimentación etapa II. Concentración del floculante de 0.025 g/L ..	107
Figura 5.10. Gráfica de interacción para la media del porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa II.....	108
Figura 5.11 Gráfica de efectos principales para las medias de porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa II.....	109
Figura 5.12. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentración de coagulante y bentonita, experimentación etapa III. pH de 6.0	110
Figura 5.13. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentración de coagulante y pH, experimentación etapa III. Concentración de bentonita de 3.0 g/L	112
Figura 5.14. Gráficas de interacción para la media del porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa III.....	113
Figura 5.15. Gráfica de efectos principales para las medias de porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa III.....	114
Figura 5.16. Gráfica del comparativo de valores de DQO en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes.....	115
Figura 5.17. Gráfica del comparativo de valores de color en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes.....	116
Figura 5.18. Fotografías representativas del tratamiento en lixiviados usando tres coagulantes diferentes.....	116
Figura 5.19. Gráfica del comparativo de valores de turbiedad en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes	119

Figura 5.20. Gráfica del comparativo de valores de DBO ₅ en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes.....	120
Figura 5.21. Gráfica del comparativo de valores del Índice de Biodegradabilidad en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes	122
Figura 5.22. Gráfica del comparativo de valores de lodos generados en el tratamiento de coagulación-floculación usando tres coagulantes diferentes.....	122
Figura 5.23. Fotografías de lodos generados en el proceso de coagulación-floculación usando tres coagulantes diferentes	123
Figura 5.24. Gráfica del comparativo de valores de pH en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes.....	124
Figura 5.25. Gráfica de los valores obtenidos de DQO y Color en los tres coagulantes usados en las condiciones óptimas.....	125
Figura 5.26. Gráfica de los valores obtenidos de Turbiedad y cantidad de lodos generados en los tres coagulantes usados en las condiciones óptimas.....	125
Figura 5.27. Gráfica de los valores obtenidos de pH en los lixiviados, inicial y final, en los tres coagulantes usados en las condiciones óptimas.....	126

LISTA DE SIGLAS

AF: Ácido fúlvico.

AH: Ácido húmico.

CESOP: Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública.

DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días.

DOF: Diario Oficial de la Federación.

DQO: Demanda química de oxígeno.

EE: Error estandar de ajuste.

F: Relación de cuadrados medios.

FIV: Factor de inflación de varianza.

FOI: Fracción orgánica disuelta hidrofílica.

FOIA: Fracción orgánica disuelta hidrofílica ácida.

FOIB: Fracción orgánica disuelta hidrofílica básica.

FOIN: Fracción orgánica disuelta hidrofílica neutra.

FOO: Fracción orgánica disuelta hidrofóbica.

FOOA: Fracción orgánica disuelta hidrofóbica ácida.

FOOB: Fracción orgánica disuelta hidrofóbica básica.

FOON: Fracción orgánica disuelta hidrofóbica neutra.

GL: Grados de libertad.

IB: Índice de Biodegradabilidad.

IC: Intervalo de confianza.

IP: Intervalo de probabilidad.

L1, L2 y L3: Lotes diferentes de pencas de nopal.

LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

LGPGR: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

LMP: Límite máximo permisible.

M1, M2 y M3: Muestras diferentes de lixiviados

MC: Media de cuadrados.

MCDM: Modelo de decisiones multicriterio.

MO: Materia orgánica.

MOD: Materia orgánica disuelta.

MOP: Materia orgánica particulada.

PECT: Procedimiento de extracción de constituyentes tóxicos.

pH: Potencial hidrógeno.

R: porcentaje de variación de la variable de respuesta.

R1, R2 y R3: Repeticiones de experimentos

RME: Residuos de manejo especial.

RP: Residuo peligroso.

RPM: Revoluciones por minuto.

RSBP: Relleno sanitario Bordo Poniente.

RSU: Residuos sólidos urbanos.

S: Media de cuadrados.

SC: Suma de cuadrados.

U Pt-Co: Unidades de color platino-cobalto.

UTN: Unidad de turbiedad nefelométrica.

Valor p: Probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula.

Valor T: Estadística de prueba.

VNS: Variable no significativa estadísticamente.

VS: Variable significativa estadísticamente.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
LISTA DE SIGLAS	xii
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
1. - INTRODUCCIÓN	5
1.1.- Justificación	5
1.2.- Objetivos.....	6
1.2.1.- Objetivo general.....	6
1.2.2.- Objetivos específicos.....	6
1.3.- Alcances	7
1.4.- Hipótesis.....	7
2.- MARCO TEÓRICO	8
2.1.- Residuos sólidos urbanos en el ámbito nacional	8
2.2.- Rellenos sanitarios en México	10
2.3.- Formación y composición típica de los lixiviados.....	13
2.4.- Los coloides en los lixiviados	18
2.5.- Materia orgánica en los lixiviados	20
2.6. Clasificación de los lixiviados.....	20
2.7.- Tratamiento de lixiviados	22
2.7.1.- Coagulación y floculación	26
2.8.- Lixiviados, manejo y gestión	38
2.9.- Normativa de lixiviados en México.....	40
2.10.- Normativa internacional de lixiviados.....	42
2.11.- Análisis proximal	42
3. ANTECEDENTES	44
3.1.- Caracterizaciones previas de lixiviados en el RSBP.....	44
3.2.- Sistemas de tratamientos de lixiviados usados actualmente en el RSBP..	45
3.3.- El nopal en México.....	47
3.4.- Investigaciones relacionadas.....	50
3.4.1.- Coagulantes inorgánicos	50
3.4.2.- Coagulantes orgánicos sintéticos	51

3.4.3.- Coagulantes orgánicos naturales	52
3.5.- Propuesta de tratamiento y aporte de la investigación	58
4.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	60
4.1.- Fase I. Extracción y caracterización del mucílago de nopal	61
4.1.1.- Extracción del mucílago de nopal	61
4.1.2.- Caracterización del mucílago de nopal.....	64
4.2.- Fase II. Muestreo de lixiviados del RSBP	71
4.3.- Fase III. Caracterización de lixiviados.....	75
4.4.- Fase IV y fase V. Pruebas de jarras	77
4.4.1.- Proceso general de coagulación-floculación	77
4.4.2.- Análisis estadístico	79
4.4.3.- Experimentación etapa I. Uso de coagulante inorgánico.....	79
4.4.4.- Experimentación etapa II. Uso de coagulante orgánico comercial	82
4.4.5.- Experimentación etapa III. Uso de mucílago de nopal.....	84
4.5.- Fase V. Establecer la factibilidad técnica-económica de los procesos evaluados.....	86
4.5.1.- Evaluación técnica.....	87
4.5.2.- Evaluación económica.....	89
5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	90
5.1.- Extracción del mucílago de nopal	90
5.2.- Caracterización del mucílago de nopal	92
5.3.- Muestreo de lixiviados	95
5.4.- Caracterización de lixiviados crudos.....	95
5.5.- Análisis estadístico	96
5.6.- Análisis del comportamiento de las variables, interacciones y efectos principales.....	99
5.6.1.- Experimentación etapa I. Uso de coagulante inorgánico.....	99
5.6.2.- Experimentación etapa II. Uso de coagulante orgánico comercial	105
5.6.3.- Experimentación etapa III. Uso de coagulante orgánico natural.....	110
5.7.- Tratamiento de lixiviados	114
5.7.1.- DQO	115
5.7.2.- Color	116
5.7.3.- Turbiedad	119
5.7.4.- DBO ₅	120
5.7.5.- Índice de Biodegradabilidad	120

5.7.6.- Cantidad de lodos generados.....	121
5.7.7. pH.....	123
5.7.8. Condiciones óptimas.....	125
5.8.- Matriz de Decisión Multicriterio: Evaluación técnico-económica.....	127
6.- CONCLUSIONES	132
7.- RECOMENDACIONES	134
8.- REFERENCIAS.....	135
9.- ANEXOS	146
9.1.- Datos experimentales	146
9.1.1.- Experimentación etapa I. Uso de cloruro férrico.....	146
9.1.2.- Experimentación etapa II. Uso de poliamina	149
9.1.3.- Experimentación etapa III. Uso de mucílago de nopal.....	152
9.2.- Datos ingresados y valores estadísticos generados en Minitab	155
9.2.1.- Experimentación etapa I. Uso de cloruro férrico.....	155
9.2.2.- Experimentación etapa II. Uso de poliamina	157
9.2.3.- Experimentación etapa III. Uso de mucílago de nopal.....	159
9.3.- Relación de costos usados en este trabajo de tesis para la realización de la Matriz de Decisión Multicriterio	161
9.5.- Artículos de investigación generados producto de este trabajo de tesis..	161
9.4.- Actividades complementarias desarrolladas en este trabajo de tesis	162
9.6.- Código de Ética.....	162

RESUMEN

El uso de rellenos sanitarios como sistema de gestión final a los residuos sólidos urbanos (RSU) es la alternativa más empleada en México (SEMARNAT, 2013), generándose como subproductos lixiviados y biogás. Como una alternativa al tratamiento de lixiviados por el método de coagulación-floculación surge la necesidad de usar nuevos reactivos, de forma que se aprovechen residuos sólidos orgánicos. Partiendo de esta necesidad los objetivos de esta investigación fueron: primeramente, determinar el mejor proceso de extracción del mucílago de *Opuntia ficus-indica*, valorando su rendimiento de extracción y su composición; así como determinar los valores óptimos de las variables del proceso de coagulación-floculación (pH, dosis de coagulante y floculante) usando como coagulantes un polímero orgánico natural (mucílago de *Opuntia ficus-indica*), un polímero orgánico comercial (poliamina) y cloruro férrico, a través del modelo de superficie de respuesta. Finalmente, Se evaluó la factibilidad técnico-económica usando la metodología de Matriz de Decisión Multicriterio (MDMC).

La experimentación incluyó tres etapas, evaluando diferentes coagulantes: etapa I, usando cloruro férrico; etapa II, usando poliamina; y etapa III, usando mucílago de nopal con bentonita. Se desarrolló un diseño factorial completo con dos niveles para el pH y tres niveles para las dosis de coagulante y floculante. Los parámetros evaluados fueron: concentraciones de coagulante y floculante, y pH; la variable de respuesta fue el porcentaje de remoción de demanda química de oxígeno (DQO).

De los procedimientos de extracción de mucílago evaluados, el escaldado fue el que generó mucílago con mayor contenido de carbohidratos. De acuerdo con los modelos estadísticos propuestos se identificaron los términos significativos para cada tratamiento y se determinaron las condiciones óptimas para la máxima remoción de DQO, obteniéndose la mejor remoción de DQO de 70.3% al usar 1.0 g/L y 3 g/L de mucílago de nopal y bentonita, respectivamente. En relación con el Índice de Biodegradabilidad (IB), en las condiciones óptimas, las etapas I y III, usando cloruro férrico y mucílago de nopal, lograron un incremento, de 0.016 a 0.03.

La cantidad de lodos generados usando cloruro férrico fue seis veces mayor que usando mucílago de nopal. La evaluación técnico-económica en las condiciones óptimas mostró que la opción mejor evaluada, con un valor de 82.8, fue usando mucílago de nopal y bentonita. La alternativa de uso de nopal propuesta en esta investigación es una opción de valorización de las pencas que los productores consideran un desperdicio.

ABSTRACT

The use of landfills as a final management system for urban solid waste (MSW) is the most widely used alternative in Mexico (SEMARNAT, 2013), generating leachate and biogas as by-products. As an alternative to the treatment of leachates by the coagulation-flocculation method the need to use new reagents arises, so that organic solid wastes are taken advantage of. Based on this need, the objectives of this research were: first, to determine the best extraction process of *Opuntia ficus-indica* mucilage, assessing its extraction yield and composition; (pH, coagulant dose and flocculant) using as coagulants a natural organic polymer (*Opuntia ficus-indica* mucilage), a commercial organic polymer (polyamine) and ferric chloride, through the response surface model. Finally, technical-economic feasibility was evaluated using the Multicriteria Decision Matrix methodology (MDMC).

Experimentation included three stages, evaluating different coagulants: stage I, using ferric chloride; step II, using polyamine; and stage III, using bentonite nopal mucilage. A complete factorial design was developed with two levels for pH and three levels for coagulant and flocculant doses. The parameters evaluated were: concentrations of coagulant and flocculant, and pH; the response variable was the percentage of chemical oxygen demand (COD) removal.

From the mucilage extraction procedures evaluated, scalding was the one that generated mucilage with higher carbohydrate content. According to the proposed statistical models, significant terms were identified for each treatment and the optimal conditions for the maximum COD removal were determined, obtaining the best COD removal of 70.3% when using 1.0 g / L and 3 g / L mucilage of nopal and bentonite, respectively. In relation to the Biodegradability Index (IB), in the optimum conditions, stages I and III, using ferric chloride and nopal mucilage, increased from 0.016 to 0.03. The amount of sludge generated using ferric chloride was six times greater than using nopal mucilage. The technical-economic evaluation in the optimum conditions showed that the best evaluated option, with a value of 82.8, was using nopal mucilage and bentonite. The alternative of use of nopal proposed in this

research is an option of valorization of the pencas that the producers consider a waste.

1. - INTRODUCCIÓN

1.1.- Justificación

El crecimiento demográfico, la modificación de las actividades productivas y el incremento de la demanda de los servicios han rebasado la capacidad del ambiente para asimilar la cantidad de residuos generados por la población, lo que hace necesario contar con sistemas de manejo integral de residuos sólidos. El almacenamiento de residuos sólidos en rellenos sanitarios, que cumplen con la normatividad, ha permitido un gran avance en la protección del ambiente; no obstante, en ellos continuamente son generados dos grandes subproductos: la fase líquida, representada por los lixiviados y la fase gaseosa, representada por el biogás. Los lixiviados maduros presentan concentraciones muy altas de contaminantes, lo que dificulta su tratamiento mediante métodos convencionales (Luna *et al.*, 2007).

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 el lixiviado se define como:

Un líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse de los sitios en los que se depositan los residuos y que pueden dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representan un riesgo potencial a la salud humana y a los demás organismos vivos (DOF, 2004).

Debido a la compleja composición de los lixiviados y a su alto poder contaminante de suelos, aguas superficiales y subterráneas, es necesario que cuenten con un tratamiento adecuado. Los métodos empleados para este fin son en su mayoría físicoquímicos (precipitación química, adsorción con carbón activado, oxidación o reducción química, intercambio iónico, membranas, *stripping* -inyección de aire u oxígeno- y oxidación húmeda) y biológicos (aerobios y anaerobios). Surge la necesidad de desarrollar métodos alternativos y sustentables, que además de tratar

a los lixiviados, logren aprovechar residuos orgánicos generados en gran cantidad y que habitualmente no tienen ningún tipo de aprovechamiento (Lainés *et al.*, 2008).

Surge la necesidad de proponer procesos sustentables, que sean técnica y económicamente viables. La presente investigación propone la implementación de un proceso de tratamiento de lixiviados usando mucílago de nopal a través del proceso de coagulación-floculación.

1.2.- Objetivos

1.2.1.- Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de la materia orgánica usando mucílago de *Opuntia ficus-indica* en el proceso de coagulación-floculación aplicado al tratamiento de lixiviados maduros.

1.2.2.- Objetivos específicos

1. Determinar el mejor proceso de extracción del mucílago de *Opuntia ficus-indica*, valorando el rendimiento de extracción y la composición del mucílago obtenido, partiendo de métodos no estandarizados reportados en literatura.
2. Determinar los valores óptimos de las variables del proceso de coagulación-floculación (pH, dosis de coagulante y floculante) usando como coagulantes un polímero orgánico natural (mucílago de nopal), un polímero orgánico comercial (poliamina) y cloruro férrico, a través del modelo de superficie de respuesta.
3. Determinar la factibilidad técnica-económica de los tratamientos de lixiviados propuestos aplicando la metodología de Matriz de Decisión Multicriterio, asignando un peso ponderado a cada criterio, definiendo su nivel de importancia.

1.3.- Alcances

- El proceso de tratamiento de lixiviados se realizó a nivel laboratorio y fue aplicado a lixiviados colectados en la etapa III del RSBP.
- Los nopales que se usaron fueron especímenes maduros de la *Opuntia-ficus indica* de más de tres meses que se obtuvieron del Centro de Acopio del Nopal, ubicado en la Delegación Milpa Alta en la Ciudad de México.
- Se usó como coagulante orgánico comercial: poliamina, como floculante orgánico comercial: poliacrilamida y como coagulante químico cloruro férrico.

1.4.- Hipótesis

El uso del mucílago de *Opuntia ficus-indica* en el proceso de coagulación-floculación, es una medida técnica y económica viable, aplicable al tratamiento de lixiviados maduros provenientes de la etapa III del RSBP.

2.- MARCO TEÓRICO

2.1.- Residuos sólidos urbanos en el ámbito nacional

Una de las características emblemáticas del sistema económico mundial actual es basar el desarrollo de la sociedad en el crecimiento constante del consumo de bienes y servicios. Este hecho ha permitido un mejor nivel de vida a una parte de la población; sin embargo, desde el inicio de la revolución industrial este crecimiento acelerado ha traído consigo varias consecuencias: una creciente generación de desechos, un mayor consumo de bienes y un incremento de personas en busca de un mejor nivel de vida (CESOP, 2012).

En México la generación de RSU sigue creciendo a tasas mayores que los de su población (CESOP, 2012), sólo entre 1997 y 2012 creció 43.8%, pasando de 29.3 a 42.1 millones de toneladas generadas a nivel nacional (SEMARNAT, 2014). De acuerdo con Robles (2008) en el año 2005 se recolectó el 83% de los RSU generados y solo el 50% se confinó adecuadamente, el resto se depositó en sitios no controlados y en basureros a cielo abierto. El manejo inadecuado de los RSU ha sido una constante en México (CESOP, 2012).

De acuerdo con las disposiciones contenidas en la LGPGIR, artículo 5º, existen tres tipos de residuos: RSU, que tienen un carácter domiciliario; los residuos peligrosos (RP) y los residuos de manejo especial (RME) (Diputados LXII Legislatura, 2015b). Desafortunadamente en las entidades federativas se ha puesto más énfasis en la regulación y administración de los servicios de limpia, que en el manejo seguro y ambientalmente adecuado de los residuos.

En México no se ha logrado una gestión sustentable de los residuos sólidos, ni se ha conseguido que el manejo de éstos sea ambientalmente efectivo, socialmente aceptable y económicamente viable. Desde la aplicación de la normativa actual en RSU ha crecido el número de rellenos sanitarios, que, aunque ambientalmente hablando no son el ideal, contrastan con los basureros al aire libre y con la quema de basura, todavía de uso en nuestro país (CESOP, 2012).

En México más de 70% de los RSU son factibles de ser reciclados fácilmente y podrían ser reutilizados. Los Estados con las Zonas Metropolitanas más pobladas son asimismo los Estados más desarrollados económicamente hablando y su producción de residuos comprende más de la mitad de lo producido en el país.

En el caso de la Ciudad de México el proceso de recolección y reciclado de basura está bien organizado; sin embargo, la cooperación con los municipios vecinos de la zona es prácticamente inexistente. Un ejemplo de esto es la modificación a la Normal Ambiental NADF-024, que establece los criterios para la separación y recolección de residuos sólidos en la Ciudad de México. Este ordenamiento, que entró en vigor el 8 de julio de 2017, contempla una nueva clasificación para la separación de desechos: orgánicos, inorgánicos reciclables, inorgánicos no reciclables y de manejo especial. Dicho criterio sigue el principio del Programa “Basura Cero”, que busca disminuir, aprovechar y valorizar al máximo los residuos que se generan en la capital del país (SEDEMA, 2017). En el caso de Monterrey, en donde si bien el proceso de recolección de residuos es menos eficiente y casi rústico, se ha logrado organizar la disposición en un solo lugar, destacando el primer ejercicio del país en generación de electricidad a partir de gas metano, originado por el relleno sanitario de su zona metropolitana (CESOP, 2012). SEMARNAT (2013) señala que de los RSU generados en México únicamente el 61% son depositados en un relleno sanitario y que solamente el 11% es reciclado, confirmándose aún lo mucho que falta por hacer en esta área de gestión (Figura 2.1).

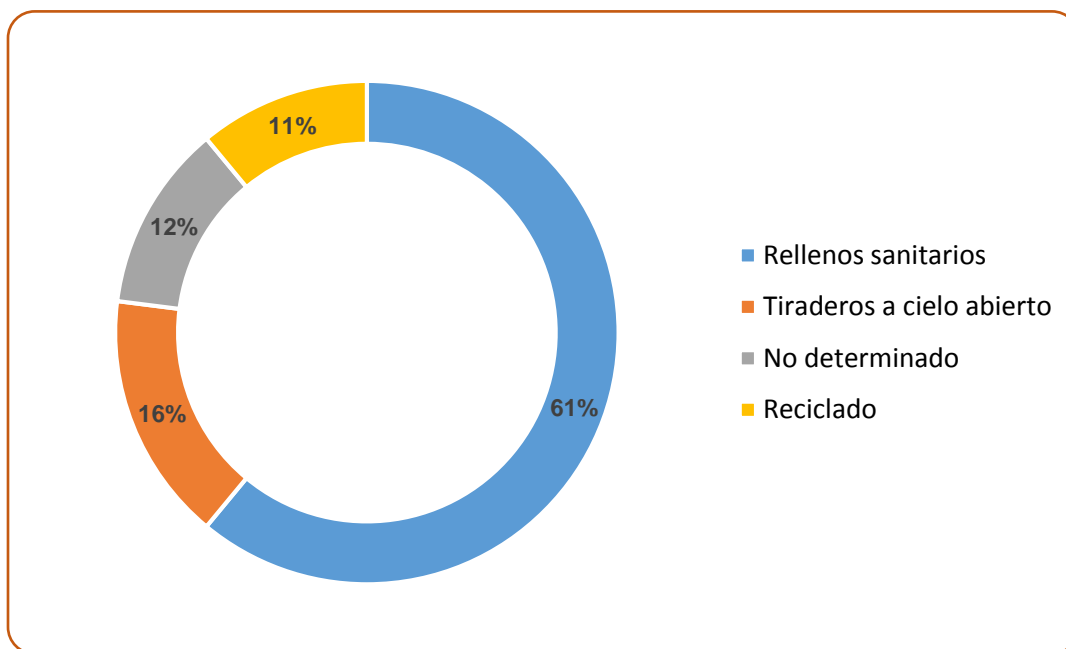


Figura 2.1. Gráfica en porcentaje de la disposición final de residuos sólidos urbanos en México. Fuente: Adaptado de SEMARNAT (2013)

2.2.- Rellenos sanitarios en México

México ocupa uno de los primeros lugares en la generación de RSU en América Latina y muy cerca del promedio de países europeos. La generación de RSU continúa en aumento, tan solo entre los años 2003 al 2011 creció un 25%, pasando de 30 a 41 millones de toneladas. En la Ciudad de México y el Estado de México se generan cerca del 28% del total de RSU en México, y de acuerdo con la SEMARNAT (2012) su generación aumenta cerca de 1 millón de toneladas al año.

Una correcta gestión de RSU se relaciona con las diferentes etapas del proceso: generación, manipulación, disposición, selección, almacenamiento, recolección, transferencia, separación y reciclaje, valoración, disposición final y tratamientos; sin olvidar incluir actividades de clausura y saneamiento de los sitios de disposición final (Andrés y Rodríguez, 2008).

En suma, de no contar con un sistema de manejo integral de RSU cualquier ciudad está expuesta a alguno de los siguientes problemas: bloqueo de corrientes de agua, deterioro de lugares de recreación, contaminación de acuíferos, contaminación de cuerpos de agua superficiales, salinización de suelos, proliferación de fauna nociva, generación de malos olores, emisiones de contaminantes al aire y contaminación causada por incendios de los sitios informales de disposición final -basureros- (Vera, 2011).

Como alternativas a la disposición final de los RSU existen varias opciones: la generación de composta (aprovechando la fracción orgánica de los residuos), la incineración (caso de algunas empresas cementeras usando el proceso de *coprocesamiento*) y el uso de rellenos sanitarios. En México la alternativa del uso de relleno sanitario es muy usada, se estima que el 78.5% del volumen generado de RSU en México se dispuso en rellenos sanitarios y sitios controlados (SEDESOL, 2017).

La disposición final de RSU en rellenos sanitarios o en basureros a cielo abierto da lugar a la generación de diferentes productos contaminantes, derivados de los procesos de descomposición microbiana y liberación de componentes contaminantes de los residuos. La contaminación en estos sitios de disposición final puede presentarse en diferentes formas (Kíss y Encarnación, 2006):

- Forma sólida (polvo y materiales ligeros arrastrados por el viento).
- Forma líquida (lixiviados), incluyendo partículas sólidas suspendidas.
- Forma gaseosa (biogás).
- Humo de incendios provocados y autoincendios eventuales.

Los subproductos más agresivos para el ambiente son los lixiviados y el biogás. El biogás, producto de la digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos, es una mezcla de gases en cuya composición se reconocen principalmente dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) -siendo ambos compuestos generadores del efecto invernadero-; además, de un gran número de gases traza: monóxido de

carbono, nitrógeno, oxígeno, compuestos orgánicos, sulfuro de hidrógeno y amoníaco (Vera, 2011).

Los residuos al ser colocados en su disposición final sufren un proceso de descomposición, formándose un efluente líquido (por la percolación del agua de lluvia a través del lecho de los residuos, sumado a su propia humedad). Este líquido disuelve los diferentes componentes dentro de los residuos, generando un residuo acuoso llamado lixiviado (Vera, 2011). Los lixiviados maduros son generalmente de un intenso color negro/marrón, un desagradable olor y con elevada toxicidad; incluyen concentraciones altas de contaminantes orgánicos e inorgánicos, incluyendo: ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal, metales pesados, sales inorgánicas y una gran variedad de microorganismos existentes en la biomasa (Vera, 2011; Nájera *et al.* 2010) y son catalogados como uno de los residuos más complejos y difíciles de tratar (Nájera *et al.*, 2010). En el año 2015 existían 285 rellenos sanitarios en México (SEMARNAT, 2016). En la Figura 2.2 se muestra la tendencia, en incremento, de esta alternativa de disposición final.

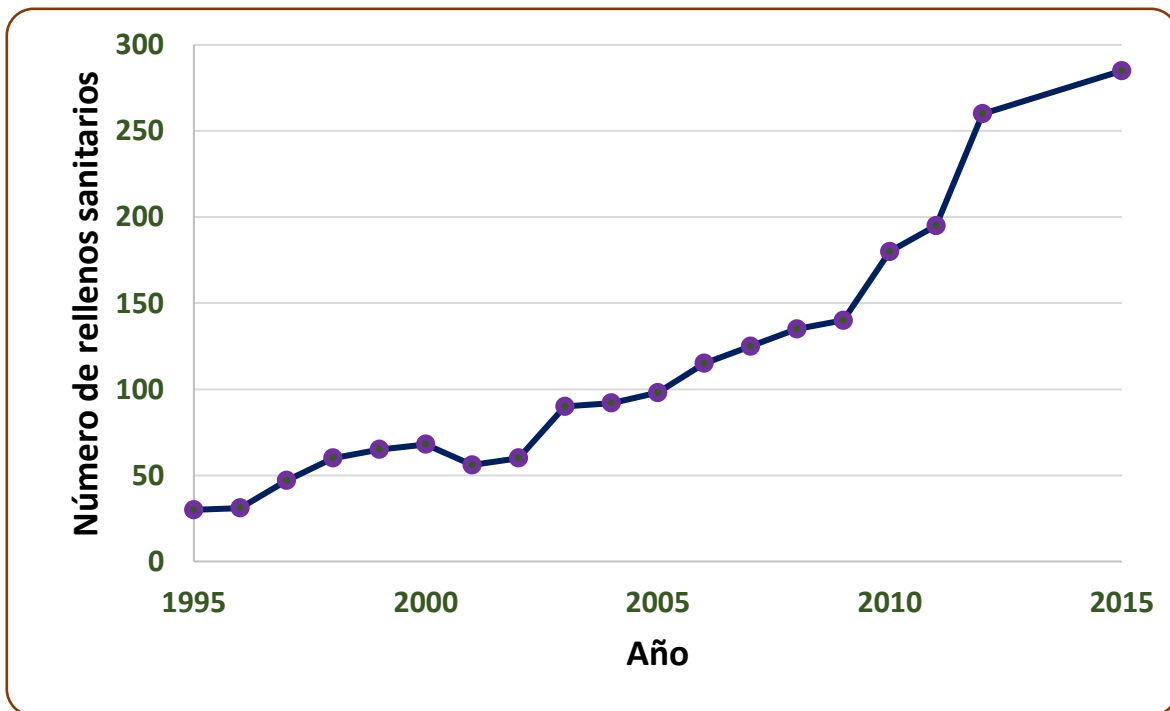


Figura 2.2. Gráfica del número de rellenos sanitarios en México. Fuente: Adaptado de SEMARNAT (2013), con datos de los años 1995 al 2015

En México la mayoría de los rellenos sanitarios no cumplen con la normativa de control de lixiviados, solo el 34% de ellos cuentan con laguna de evaporación o recirculación. En el restante 66% los lixiviados escurren libremente, pudiendo contaminar cuerpos de agua de los alrededores (INEGI, 2010; Nájera *et al.*, 2010; Rojas-Valencia, 2011).

En el grupo de los rellenos sanitarios que cuentan con laguna de evaporación y recirculación se incluyen los ubicados en las ciudades de Mérida, Durango, Nuevo Laredo, Tamaulipas, Puebla, León, Guanajuato, Aguascalientes, Monterrey, Tlalnepantla, Tecámac y Naucalpan; además, del Relleno Sanitario Bordo Poniente (RSBP), ubicado en la Ciudad de México. De acuerdo con información generada en visitas realizadas, del total de rellenos sanitarios en toda la República Mexicana únicamente dos de ellos, el de Tlalnepantla y el RSBP, cuentan con sistemas adicionales de tratamiento (Nájera *et al.*, 2010).

2.3.- Formación y composición típica de los lixiviados

La formación de los lixiviados en un relleno sanitario varía según la zona y la época del año, pudiendo contener iones amonio, compuestos orgánicos e inorgánicos y un gran número de contaminantes a diferentes niveles de concentración, en forma disuelta y en suspensión. Debido a su heterogeneidad y complicada composición pueden afectar significativamente al ambiente; de hecho, puede considerarse a los rellenos sanitarios como un gran reactor en el que se presentan interacciones bioquímicas y físicoquímicas, que están en relación con la naturaleza de los residuos presentes y de las condiciones físicas y meteorológicas del lugar, sumándose nuevos constituyentes a los contaminantes que ya estaban presentes. Los lixiviados solubilizan los contaminantes iniciales y los de nueva creación (Heger y Stegmann, 2015).

Debido a que la mayoría de los municipios considera al relleno sanitario como la mejor opción para la disposición final de los RSU es importante una buena gestión de sus dos principales subproductos: biogás y lixiviados. En los lixiviados se pueden presentar reacciones físicoquímicas y/o microbiológicas de solubilidad; además, de

ruptura de moléculas complejas en compuestos de bajo peso molecular. Es común encontrar mezclas de metales pesados, compuestos orgánicos y sustancias nitrogenadas, en donde tienen influencia las condiciones climatológicas y el volumen de RSU depositados. (Robles, 2008).

Los lixiviados mal manejados pueden ser un factor de contaminación, derivando en riesgos a la salud y al ambiente (Alcantar, 2015). Según Tchobanoglous *et al.* (1994) la gestión de lixiviados es clave para la eliminación del potencial que tiene un relleno sanitario de contaminar acuíferos subterráneos.

En un relleno sanitario la degradación de la materia orgánica se realiza mediante procesos biológicos aerobios y anaerobios. El periodo de tiempo en el que se presentan cada fase depende del contenido de humedad de los RSU, la infiltración del agua de lluvia, la densidad de la compactación inicial y la disponibilidad de los nutrientes (Robles, 2008). El proceso aerobio inicia desde que los RSU son depositados y tapados con material de cubierta limo-arenoso o limo-arcilloso. El proceso aerobio continua hasta agotarse el oxígeno presente dentro de los residuos (Alcantar, 2015). La fracción orgánica, al igual que la inorgánica, realizan aportes a la generación de los lixiviados y del biogás (Kíss y Encarnación, 2006). Todas estas aportaciones se presentan en la Tabla 2.1.

Para describir la generación de los lixiviados en un relleno sanitario deben de considerarse los periodos de descomposición de los residuos en función del tiempo, desarrollándose cinco fases sucesivas, mostradas en la Figura 2.3. Estas cinco fases se describen a continuación (Alcantar, 2015; Robles, 2008):

- Fase I. Fase inicial, incluye los primeros días de depósito de los RSU, presentándose condiciones de descomposición aerobia.
- Fase II. Inicia el descenso de oxígeno y comienzan a presentarse condiciones anaerobias de degradación. El pH de los lixiviados generados comienza a decrecer debido a la presencia de ácidos orgánicos y a la presencia de dióxido de carbono.

Tabla 2.1. Aportaciones del material orgánico e inorgánico de los RSU en un relleno sanitario

Residuos sólidos			
Compuestos inorgánicos	Compuestos orgánicos (descomposición y biodegradación)		
	Con oxígeno (fase aerobia)	Sin oxígeno (fase anaerobia)	
Reacciones de disolución (hidrólisis)	Reacciones de oxidación (nitrificación)	Reacciones de reducción (desnitrificación)	
(Fe, Cu, Ni, Ca, Cr, etc.) + NH ₃ (iones, cationes y materiales disueltos).	CO ₂ + NO ₂ + H ₂ O + calor (50 a 70 °C) + compuestos orgánicos volátiles y solubles.	CH ₄ + CO ₂ + NH ₃ + H ₂ S + compuestos orgánicos volátiles y solubles.	
Fase líquida (sales disueltas + compuestos orgánicos solubles).		Fase gaseosa (gases + compuestos evaporados).	Fase líquida (compuestos orgánicos solubles).
Lixiviados		Biogás	Lixiviados

Fuente: Adaptado de SEMARNAT, 2006

- Fase III. Conocida como fase ácida, se incrementa la actividad bacteriana iniciada en la fase II, sumándose formación adicional de ácidos orgánicos y trazas de hidrógeno. En esta fase se presentan la hidrólisis de compuestos de alto peso molecular -lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos- y la acidogénesis, en donde se presenta la conversión microbiana de las moléculas generadas en la hidrólisis en compuestos intermedios de bajo peso molecular -ácido acético, ácido fúlvico y otros ácidos complejos-. El dióxido de carbono es el principal componente obtenido en esta fase, por lo que los lixiviados generados tiene un pH de 5 o menor. Los valores de DBO₅, DQO y conductividad se incrementan considerablemente debido a la disolución de los ácidos orgánicos presentes; además, se favorece la solubilidad de los metales presentes.
- Fase IV. Se presentan reacciones de formación de metano, disminuyendo de manera simultánea la acidez, por lo que los lixiviados generados presentan pH entre 6.8 a 8.0, reduciéndose las concentraciones de DQO, DBO₅ y conductividad presente.

- Fase V. Conocida como fase de maduración, se presenta después de que la materia orgánica se ha convertido en metano y dióxido de carbono. En caso de presencia excesiva de humedad y de sustratos de degradación lenta, se disminuye la formación de biogás, migrando los lixiviados formados a ácidos húmicos y fúlvicos.

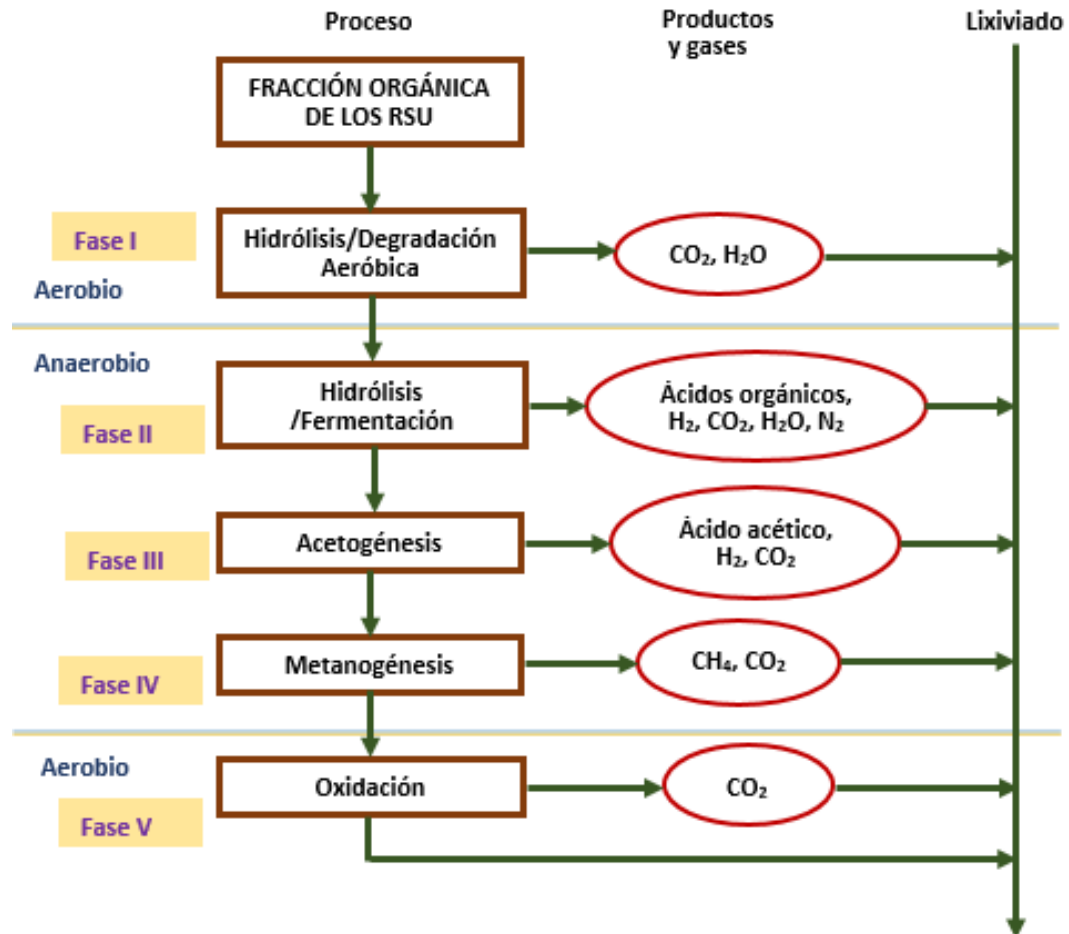


Figura 2.3. Aportación de las fases de descomposición de RSU en la formación de lixiviados. Fuente: Adaptado de Alcantar (2015)

En la Figura 2.4 se muestra el diagrama que representa el comportamiento de la formación de los principales componentes de los lixiviados generados, en relación con cada una de sus fases.

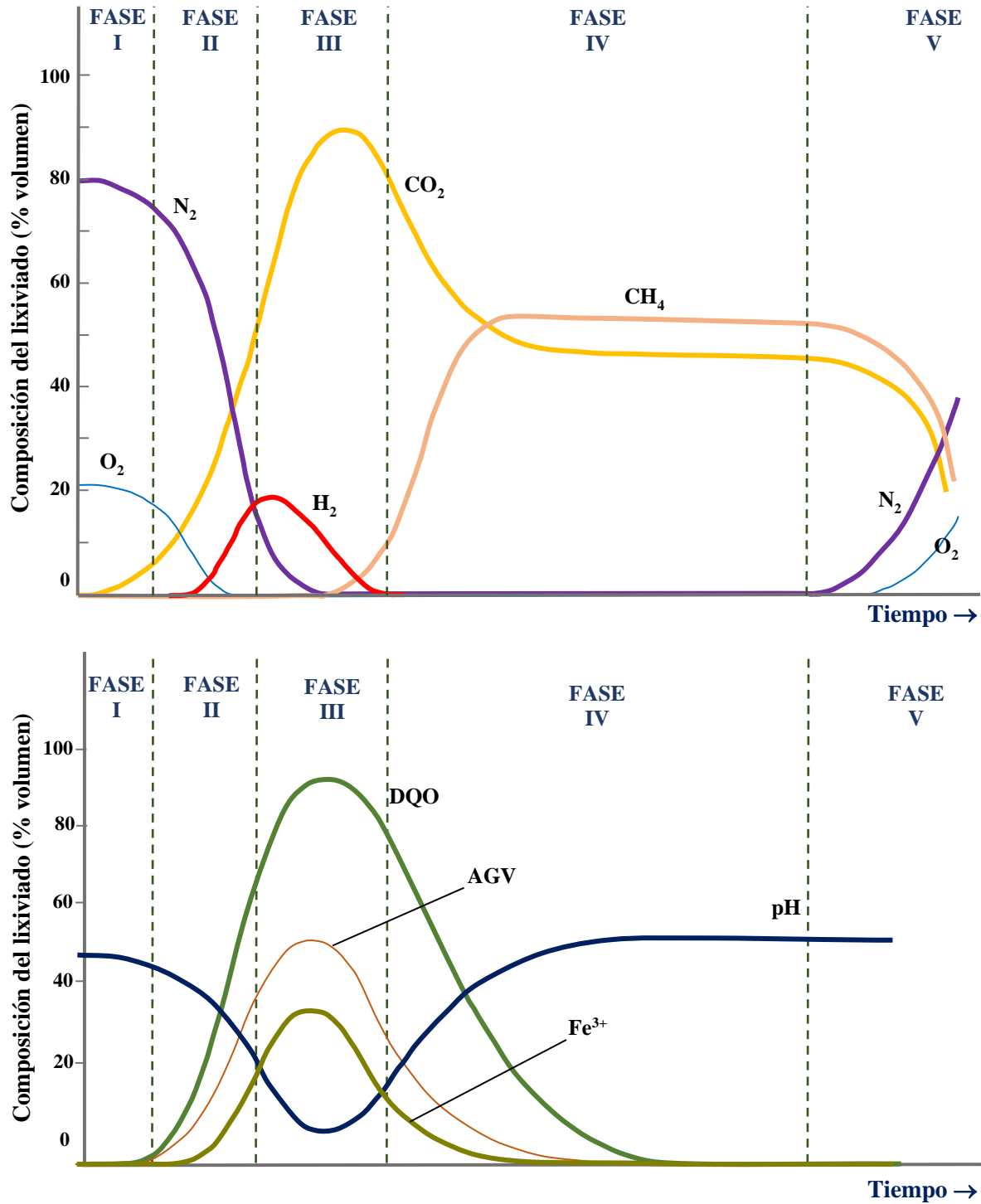


Figura 2.4. Comportamiento de la formación de los principales componentes del lixiviado en relación con sus fases de formación. Fuente: Adaptado de Johannessen (1999). AGV: Ácidos grasos volátiles

Las sustancias que se han encontrado en los lixiviados pueden ser clasificadas en cuatro tipos (Robles, 2008):

- La fracción mineral o inorgánica que está constituida esencialmente de cloruros, bicarbonatos, nitratos, iones amonio, sodio, potasio y de ciertas sales metálicas. Estas sales inorgánicas provienen de la mineralización biológica de los residuos. Los iones amonio, sulfuro y ferrosos son potencialmente oxidables por bacterias quimiolitótrofas cuando los lixiviados se encuentran en condiciones aerobias.
- La fracción orgánica fácilmente biodegradable formada por ácidos grasos volátiles (sobre todo los ácidos acético, propiónico y butírico), representan generalmente la mayor parte de la carga orgánica, en el caso de los lixiviados de disposición final reciente.
- La fracción orgánica “estabilizada”, está constituida de compuestos fúlvicos y húmicos, que son moléculas orgánicas complejas de origen natural muy poco biodegradables.
- La fracción orgánica xenobiótica: está constituida principalmente de compuestos sintéticos de uso industrial y doméstico, como los incluidos en formulaciones de productos farmacéuticos, cosméticos, plaguicidas, desinfectantes, colorantes, barnices, lacas, lubricantes y aceites, plásticos, resinas, solventes, etc.

2.4.- Los coloides en los lixiviados

Los lixiviados contienen material suspendido que incluye sólidos que pueden sedimentar en reposo, o sólidos dispersados que no sedimentan con facilidad. Una parte considerable de estos últimos pueden ser coloides. En los coloides cada partícula se encuentra estabilizada por una serie de cargas de igual signo sobre su superficie, haciendo que se repelan partículas vecinas. Puesto que esto impide el choque de las partículas y que formen así masas mayores, llamadas flóculos, las partículas no sedimentan. Las operaciones de coagulación y floculación desestabilizan los coloides y consiguen su sedimentación. Esto se logra con la adición de agentes químicos y aplicando energía de mezclado. Los coloides

generalmente son estables en solución al predominar los factores estabilizantes - fuerzas electrostáticas y la propia hidratación- que les permite permanecer en dispersión durante mucho tiempo a través de la repulsión entre las partículas (Carpinteyro, 2011).

Las especies coloidales presentes en los lixiviados incluyen arcillas, sílice, hierro, metales pesados y sólidos orgánicos. Los lixiviados contienen sustancias tanto disueltas como en suspensión y ambas pueden ser orgánicas e inorgánicas. Los materiales en suspensión pueden tener un tamaño y densidad tal que pueden eliminarse del agua por simple sedimentación, pero algunas de ellas son de un tamaño tan pequeño y tienen una carga eléctrica superficial negativa que las hace repelerse continuamente, impidiendo su aglomeración y formación de una partícula más pesada y poder así sedimentar. Estas partículas, con una dimensión que suele estar comprendida entre $1\mu\text{m}$ y $0,2\mu\text{m}$ son las partículas coloidales. Las partículas en suspensión provienen de sustancias minerales y de la descomposición de sustancias orgánicas (Manahan, 2013).

La turbiedad en lixiviados se debe principalmente a las partículas coloidales y a otras sustancias insolubles de mayor tamaño en suspensión tales como arcillas, minerales, plancton y otros microorganismos y materias orgánicas e inorgánicas finamente divididas. En cuanto al color en lixiviados suele ser de naturaleza orgánica, pudiendo ser coloidal y también formando soluciones verdaderas. Las principales sustancias causantes del color en el agua son las sustancias húmicas, materia orgánica (MO), formadas principalmente por los ácidos fúlvicos (AF) y húmicos (AH). El color también puede deberse a hidróxidos metálicos. Una influencia importante de los coloides en la química es su habilidad para transportar contaminantes orgánicos e inorgánicos, los contaminantes se enlazan a la superficie de las partículas coloidales (Manahan, 2013).

2.5.- Materia orgánica en los lixiviados

La MO presente en los lixiviados es una mezcla de compuestos con estructuras aromáticas y alifáticas con diferentes grupos funcionales. Los AH y AF representan a la fracción hidrofóbica de la MO (Gou *et al.*, 2009).

Algo importante a considerar en tratamiento de lixiviados con el proceso de coagulación-floculación es que los flóculos producidos tienen la capacidad de adsorber MO, posterior al proceso de coagulación-floculación (Chen *et al.*, 2007). Una característica inherente a los lixiviados maduros es su color café oscuro, prácticamente marrón y precisamente este parámetro ha sido identificado como medida indirecta de la presencia de MO (Chow *et al.*, 2008; Matilainen *et al.*, 2011).

AH y AF son el resultado de las últimas fases de transformación de la materia orgánica (Proferfol, 2002; Selman, 1980). Son complejas agrupaciones macromoleculares en las que las unidades fundamentales son compuestos aromáticos de carácter fenólico procedentes de la descomposición de la materia orgánica y compuestos nitrogenados, tanto cíclicos como alifáticos (Masoagro, 2012). Los AH y AF por si mismos o por interacción con constituyentes inorgánicos forman complejos coloidales (Selman, 1980).

AH son la fracción de las sustancias húmicas solubles en medio alcalino e insolubles en medio ácido, son una sustancia negra con un alto grado de humificación, estructura compleja, solubles con dificultad, pero dispersables. AF son la fracción de las sustancias húmicas solubles, tanto en medio alcalino como en medio ácido, son una sustancia amarillenta con menor grado de humificación y estructura mucho más sencilla, muy solubles en agua (Selman, 1980).

2.6. Clasificación de los lixiviados

Diversos autores clasifican a los lixiviados de acuerdo con diferentes criterios (Tabla 2.2). Johannesen (1999) los caracteriza en dos etapas principales: etapa ácida y etapa metanogénica. Bhalla *et al.* (2012) y Kurniawan *et al.* (2006) proponen clasificarlos en tres categorías: jóvenes, intermedios y maduros, estableciendo una

caracterización para cada uno de ellos, aunque difieren en los valores que establecen en algunos de los parámetros, aunque de acuerdo con investigaciones realizadas en el área de tratamiento de lixiviados (Amokrane *et al.*, 1997; Andía, 2000; Aziz *et al.*, 2007; Nájera *et al.*, 2009; Nájera *et al.*, 2011) tienen más uso los criterios establecidos por Bhalla *et al.* (2012).

Tabla 2.2. Clasificación de lixiviados (de acuerdo con varios autores con base en tres criterios)

Clasificación de lixiviados			
I. Por sus etapas de formación (Johannesen, 1999).			
Parámetro	Unidad	Etapá ácida	Etapá metanogénica
pH		5.0-6.5	7.5-9.0
DQO	g/L	20-30	1.5-2.0
DBO ₅	g/L	oct-25	0.5-1.0
II. Por el tipo de lixiviados (Bhalla <i>et al.</i> , 2012).			
Parámetro	Tipo de lixiviados		
	Joven	Intermedio	Maduro
Edad (años)	<5.0	5.0-10.0	>10
pH	<6.5	6.5-7.5	>7.5
DQO (mg/L)	>10, 000	4,000- 10,000	<4,000
DBO ₅ /DQO	>0.3	0.1-0.3	<0.1
Compuestos orgánicos (%)	80 AGV	5-30 AGV + AH y AF	>5 AH y AF
Metales pesados (factibilidad de tratamiento)	Bajo-Medio	Bajo	Bajo
Biodegradabilidad (factibilidad de tratamiento)	Alta	Media	Baja
III. Por el tipo de lixiviados (Kurniawan <i>et al.</i> , 2006).			
Parámetro	Tipo de lixiviados		
	Joven	Intermedio	Maduro
Edad (años)	<1.0	1.0-5.0	>5.0
pH	<6.5	6.5-7.5	>7.5
DQO (mg/L)	>15, 000	3,000- 15,000	<3,000
DBO ₅ /DQO	0.5-1.0	0.1-0.5	<0.1
NH ₃ -N (mg/L)	<400	ND	>400
COT/DQO	<0.3	0.3-0.5	>0.5
Nitrógeno Kjehdal (g/L)	0.1-2.0	ND	ND
Metales pesados (mg/L)	>2	<2	<2

AGV: Ácidos grasos volátiles. **AH:** Ácidos húmicos. **AF:** Ácidos fúlvicos. **ND:** Dato no disponible. **COT:** Carbón orgánico total. Fuente: Johannesen (1999), Bhalla *et al.* (2012) y Kurniawan *et al.* (2006)

2.7.- Tratamiento de lixiviados

La toxicidad de los lixiviados y la observada en sitios de disposición de residuos industriales es muy similar (Rojas-Valencia y Sahagún, 2012). Aunque los efectos de los lixiviados en relación con la mutagenicidad/genotoxicidad no se han estudiado a detalle, Cobos *et al.* (2012) afirman que los compuestos orgánicos presentes en los lixiviados causan actividad mutagénica.

De acuerdo con pruebas de toxicidad realizadas, empleando diferentes especies de organismos (*Vibrio fisheri*, *Daphnia sp.*, *Artemia salina*, entre otras más), se ha confirmado el peligro potencial de los lixiviados de rellenos sanitarios y la necesidad de que reciban tratamiento, ya que sus efectos pueden ir desde la inhibición en el crecimiento hasta la mutación e incremento de mortalidad (Rosales, 2014). El objetivo del tratamiento es reducir la concentración de contaminantes a niveles aceptables para ser aptos para reuso.

Dado que las características de los lixiviados varían considerablemente, en calidad y cantidad, es muy importante conocer los valores de algunos parámetros, con la finalidad elegir el tratamiento adecuado a fin de satisfacer la calidad ambiental requerida. Debido a la complejidad de la matriz de los lixiviados es muy difícil que un solo tipo de tratamiento consiga un efluente apto para ser vertido al ambiente, por lo que en muchas ocasiones los tratamientos completos consisten en la suma de diferentes procesos en serie (Rosales, 2014). En condiciones normales de operación de un relleno sanitario tradicional se generan cantidades regulares de lixiviados en concentraciones de contaminantes por arriba de los límites máximos permisibles, por lo que el tratamiento es necesario (SEMARNAT, 2009).

Habitualmente en un relleno sanitario se dispone de un drenaje en el fondo del vaso de vertido para evacuar los lixiviados producidos y las aguas pluviales. Los lixiviados se conducen a una bolsa de recogida que tiene por fin almacenar y disminuir la producción de lixiviados por evaporación. El tratamiento de los lixiviados procedentes de los residuos sólidos se basa en general en su recolección y transporte a una instalación preparada para el tratamiento; no obstante, en función

del grado de humedad de los residuos, es posible plantear su utilización, recirculándolos, regando la superficie de los residuos sólidos, en el caso de que la humedad del residuo que se reciba sea baja (SEMARNAT, 2009).

Como cualquier líquido contaminado, con la necesidad de proporcionarle un tratamiento, uno de los primeros pasos en la gestión es su caracterización. Existen dos parámetros básicos al momento de decidir el sistema de tratamiento a emplearse: la carga orgánica medida como DBO₅ y DQO; además de la relación existente entre ambos (DBO₅/DQO), conocido como Índice de Biodegradabilidad (IB), que define en gran medida la biodegradabilidad de los lixiviados. Kurniawan *et al.* (2006) proponen en el caso de los lixiviados jóvenes la aplicación de tratamientos biológicos para su tratamiento, mientras que en el caso de los lixiviados maduros indican que los procesos físicoquímicos se convierten en la mejor alternativa.

En el tratamiento de los lixiviados, dentro de los tratamientos físicoquímicos, destacan la coagulación y la oxidación química; además, de la adsorción con carbón activado, la precipitación química y los procesos con membrana (Amokrane *et al.*, 1997). En el tratamiento de los lixiviados la coagulación se ha empleado como pretratamiento previo a los procesos biológicos o como etapa de pulimento para remover componentes orgánicos no biodegradables; o bien, bajo esquemas acoplados de procesos de oxidación avanzada (Orta y Monje-Ramírez, 2006).

Renou y Givaudan (2008) reportan 15 estudios de tratamiento de lixiviados, usando el proceso de coagulación-floculación alrededor del mundo, donde se ha experimentado con diferentes coagulantes -sulfato de aluminio y cloruro férrico- buscando las condiciones experimentales óptimas de pH, dosis y velocidades de mezclado, logrando eficiencias de remoción del 8 al 90% en DQO.

La combinación de procesos biológicos y físicoquímicos está siendo considerada recientemente como la opción más apropiada para el tratamiento de los lixiviados. La integración de procesos biológicos y físicoquímicos (en cualquier orden) constituyen una excelente alternativa de tratamiento. Adicionalmente a los cambios naturales en la composición de los lixiviados, debe de considerarse condiciones de

temperatura, clima de la localidad, y edad. Todos estos factores influyen en la elección de un tratamiento específico, por lo que la metodología de tratamiento de los lixiviados debe ser flexible y adaptable (Renou y Givaudan, 2008). Los procesos de tratamiento biológico (aerobios o anaerobios) son muy efectivos para los lixiviados generados en la primera etapa de la vida del relleno sanitario con un alto IB (>0.30) -lixiviados jóvenes-.

El post-tratamiento es muy importante, ya que los contaminantes removidos por el pretratamiento son generalmente no recalcitrantes y fácilmente removibles. La adsorción es un método ampliamente empleado para la remoción de compuestos orgánicos recalcitrantes de los lixiviados de relleno sanitario (San Pedro *et al.*, 2015). Considerando las similitudes entre algunos efluentes industriales y los lixiviados es importante considerar los diferentes procesos de tratamiento y los contaminantes que remueven cada uno de ellos. En la Tabla 2.3 se muestra esta relación.

Tabla 2.3. Procesos de tratamiento usados en efluentes industriales.

Contaminante	Proceso de remoción
Sólidos suspendidos	Desbaste. Sedimentación. Separación agua-aceite. Filtración. Flotación con aire. Adición de polímeros. Coagulación /Sedimentación.
Sustancias orgánicas	Lodos activados. Filtros percoladores. Biodiscos. Lagunas de estabilización. Filtración con arena. Aeración. Sistemas físicoquímicos.
Sustancias orgánicas volátiles	Adsorción en carbón activado. Remoción de gases.
Remoción de gases	Tratamiento con bromo y cloro. Ozonificación. Radiación ultravioleta.
Nitrógeno	Nitrificación y desnitrificación en crecimiento suspendido. Nitrificación y desnitrificación en capa fija.

Fuente: Adaptado de Renou y Givaudan (2008)

Tabla 2.3. Procesos de tratamiento usados en efluentes industriales (continuación)

Contaminante	Proceso de remoción
Nitrógeno	Intercambio iónico. Remoción de amoníaco. Cloración.
Fósforo	Adición de sales de metales. Coagulación con cal / Sedimentación. Tratamiento biológico.
Metales pesados	Precipitación química. Intercambio iónico.
Sólidos orgánicos disueltos	Ósmosis inversa. Electrodialisis.

Fuente: Adaptado de Renou y Givaudan (2008)

Adicionalmente, Renou y Givaudan (2008) proponen sistemas de tratamiento, como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Sistemas de tratamientos en los lixiviados

Opciones de tratamientos en lixiviados	
1.-Transferencia de lixiviados generados	
a) Depositarlos en lagunas de estabilización.	
2.-Tratamientos físicoquímicos	
a) Flotación. b) Coagulación-floculación. c) Precipitación Química. d) Adsorción. e) Oxidación química. f) Inyección de aire.	
3.-Tratamiento biológicos	
Aerobios	Anaerobios
Biomasa suspendida	a) Manto de lodos en flujo. b) Filtros de lecho híbrido. c) Filtros anaerobios. d) Reactor de lecho fluidizado.
a) En lote. b) Biomembrana.	
Biomasa en crecimiento	
a) Filtro percolador. b) Filtro de lecho móvil.	
4.-Tratamientos de membrana	
Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.	

Fuente: Adaptado de Renou y Givaudan (2008)

2.7.1.- Coagulación y floculación

El tratamiento de los lixiviados maduros usando el procedimiento de coagulación-floculación ha sido explorado con anterioridad (Amokrane *et al.*, 1997; Tatsi *et al.*, 2003; Ntampou *et al.*, 2006; Aziz *et al.*, 2007; Lainés *et al.*, 2008; Nájera *et al.*, 2009; Nájera *et al.*, 2011; Lozano-Rivas, 2012) debido a sus características de baja biodegradabilidad, lográndose buenos resultados (Sección 3.4). Es importante entender este procedimiento. Se detalla a continuación los procesos de coagulación y floculación, así como el uso de la prueba de jarras como un medio para la selección de las mejores condiciones del proceso.

2.7.1.1.- Coagulación

Los términos coagulación y floculación se utilizan indistintamente; sin embargo, son diferentes. La confusión proviene del hecho de que ambas operaciones se producen de manera consecutiva. La coagulación es la desestabilización de la suspensión coloidal producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos. Los factores desestabilizantes de los coloides incluyen a fuerzas de atracción que dan lugar a la unión de partículas -movimiento Browniano, fuerza de Van der Waals y también en menor grado la fuerza de gravedad- (Vargas, 2004).

Las dispersiones coloidales tienen dos características comunes: su gran relación área-volumen en las partículas dispersas y el tener carga eléctrica (generalmente negativa) lo que origina una repulsión entre ellas, impidiendo su unión y separación del líquido. La coagulación tiene por objeto preparar a las partículas dispersas (mediante la anulación de las cargas superficiales) para lograr posteriormente, mediante la floculación, otras partículas más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas más fácilmente del agua (Manahan, 2013).

Para posibilitar las colisiones entre partículas es necesario establecer gradientes hidráulicos, recurriendo a la mezcla y agitación. Si las fuerzas eléctricas de repulsión entre las partículas se reducen en grado suficiente como para permitir que estas establezcan contactos entre sí (favorecidas por el movimiento browniano), las

fuerzas de London - Van der Waals (que pueden describirse como una fuerza atómica cohesiva que existe entre todos los átomos, atrayendo cada uno a todos los demás) permitirán que las partículas se adhieran unas a otras, formándose una aglomeración progresiva de estas -floculación- (Manahan, 2013; Vargas, 2004). La neutralización de la carga eléctrica del coloide, objeto de la coagulación, se realiza en los procesos de tratamiento de aguas residuales aplicando determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes), que neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales dispersas en el agua, afectando el grosor de la doble capa eléctrica, neutralizando la carga de la superficie y el estado de hidratación del coloide (Vargas, 2004).

Las reacciones de coagulación duran fracciones de segundo desde que se ponen en contacto las partículas con el coagulante. La coagulación se consigue mediante una difusión rápida de las sustancias coagulantes empleando medios de agitación (más de 200 RPM -revoluciones por minuto-). En la coagulación se reducen las cargas eléctricas superficiales de las partículas coloidales debido a la formación de hidróxidos complejos. En la eficacia de la coagulación influyen diversos factores entre los que destaca el pH y las características físicoquímicas de los lixiviados, (Vargas, 2004). Al poner en contacto las partículas coloidales con coagulantes químicos los iones de signo opuesto al de la partícula coloidal, que quedan en exceso en la disolución, rodean a la partícula formando con ésta una «doble capa eléctrica» (Figura 2.5).

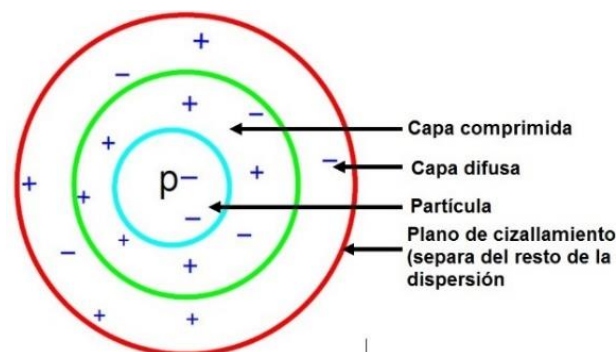


Figura 2.5. Doble capa presente en los coloides. p: partícula. Fuente. Goirdani *et al.* (2008)

Parte de estos iones quedan fijados al sólido por fuerzas electrostáticas de adsorción y los demás constituyen una zona de difusión hasta llegar a una distribución iónica uniforme en el líquido. La diferencia de potencial de esta capa difusa se conoce como «potencial electrocinético o potencial Z». La mayor parte de las sustancias que se ponen en contacto con un medio polar, como el agua, adquieren una carga eléctrica superficial por ionización o adsorción de iones, o ambas cosas a la vez (Goirdani *et al.*, 2008). La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la "nube de iones" que rodean los coloides de modo que puedan aglomerarse (Figura 2.6). La determinación adecuada del tipo de coagulante y la dosis no solo mejorará las características del agua resultante sino también disminuirá el costo del tratamiento.

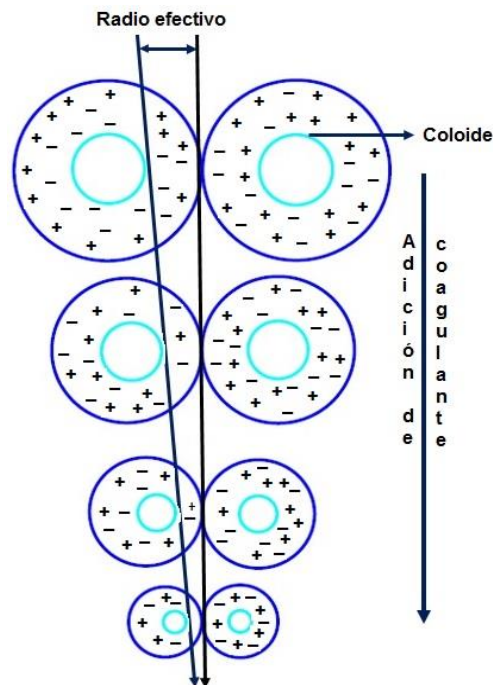


Figura 2.6. Colapso de la nube de iones en la coagulación de coloides
 Fuente: Andía (2000)

En los últimos 20 años nuevos coagulantes, tanto orgánicos como inorgánicos, se han utilizados en un intento de mejorar la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos totales en el tratamiento de aguas residuales municipales y de efluentes industriales (Zamudio, 2014). Recientemente se han estudiado biomateriales como coagulantes y floculantes, basados en plantas o en residuos

orgánicos, tales como la celulosa, almidón, alginatos y chitosán. Estos materiales son en si una materia prima renovable, biodegradable, económica y relativamente no tóxica (Lee, 2014). En la Tabla 2.5 se incluyen algunos ejemplos de coagulantes inorgánicos, orgánicos sintéticos y orgánicos naturales.

Tabla 2.5. Ejemplos de los diferentes tipos de coagulantes

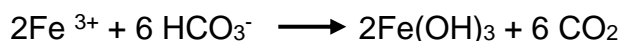
Coagulantes inorgánicos
Sulfato de aluminio, hidróxido de calcio, cloruro férrico, sulfato férrico y clorhidróxido de aluminio.
Coagulantes orgánicos sintéticos
Poliacrilamidas, poliacrilaminas, poliaminas y polídimetil dialil amonios.
Coagulantes orgánicos naturales
Celulosa, almidón, alginatos, chitosán, mucílago de nopal, gomas de semillas, pulpa de algarrobo, carboximetil celulosa, goma de guar, goma de red sorrela, silica activada, lentejas y tamarindo.

Fuente: Lainés *et al.* (2008) y Lee (2014)

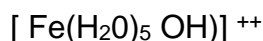
2.7.1.1.1- Uso de cloruro férrico como coagulante

El FeCl_3 es una sal de base débil que hidroliza con agua formando hidróxido férrico insoluble. La actividad coagulante del FeCl_3 no se debe a la acción directa del Fe^{3+} sobre la carga de los coloides, de hecho, en la hidrólisis de las sales el catión Fe^{3+} se combina con moléculas de agua y grupos OH^- y H^+ construyendo formas complejas, las cuales llegan incluso a polimerizarse. Estas formas complejas cargadas son solubles, rodean y son adsorbidas por la superficie del coloide, siendo las que neutralizan su carga electroestática, anulando las fuerzas repulsivas, haciendo el coloide inestable (Lainés *et al.*, 2008).

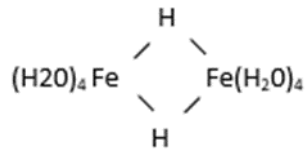
Las reacciones presentes son (Vrale y Jordan, 1994):



El $\text{Fe}(\text{OH})_3$ es hidrolizado a:



La reacción de estos productos monoméricos entre sí crea productos poliméricos del tipo:



De acuerdo con Metcalf y Eddy (1996) al formarse los hidróxidos complejos se forman adicionalmente iones hidronio, que reaccionan con la alcalinidad de los lixiviados. Estos polímeros con carga positiva desestabilizan las partículas coloidales con carga negativa presentes, reduciendo las fuerzas repulsivas. La formación de partículas grandes comienza a enredar más partículas y a aglomerarlas. La masa resultante tiene mayor densidad que los lixiviados, por lo que puede ser removido por sedimentación. Las moléculas del polímero muy largas contienen grupos que pueden absorber las partículas coloidales. La molécula del polímero puede así absorber una partícula coloidal en una de sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para absorber otras partículas. Se dice que la molécula de los polímeros forma un puente entre las partículas coloidales. Una excesiva carga de polímeros puede estabilizar nuevamente la suspensión (Figura 2.7).

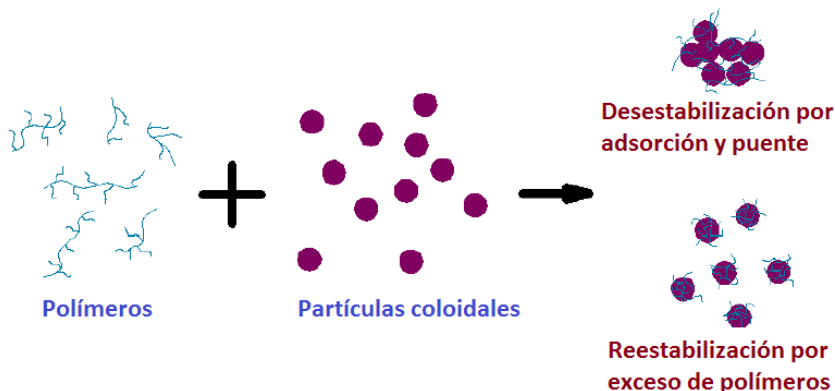
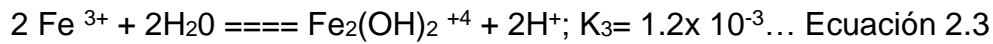
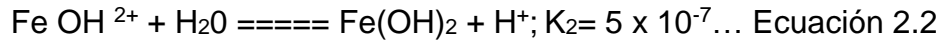
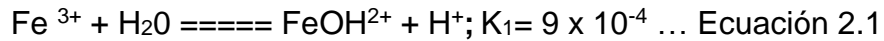


Figura 2.7. Acción de los polímeros sobre los coloides en el proceso de coagulación

Tomando en cuenta las reacciones de hidrólisis del Fe^{3+} y sus constantes de equilibrio (Ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3) a pH entre 4 y 7, se afirma que la especie $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{+4}$ es la forma preponderante (Herbert y Walter, 1982).



2.7.1.1.2- Poliaminas como coagulantes orgánicos comerciales

De acuerdo con Bolto y Gregory (2007) el mecanismo de interacción entre coloides y el polímero orgánico de poliamina se da de por adsorción y puenteo; es decir, el coloide con carga negativa es adsorbido en la proximidad de la poliamina, esta cercanía provoca formación de enlaces o puentes de hidrógeno con los átomos de nitrógeno del polímero (Figura 2.8).

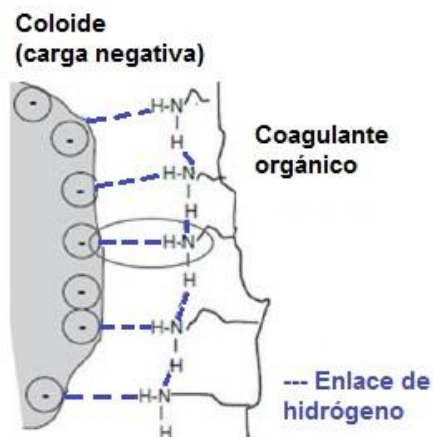


Figura 2.8. Mecanismo de interacción entre coloides y una poliamina.
Fuente: Bolto y Gregory (2007)

El nitrógeno es un átomo con un carácter fuertemente electronegativo. Se ha establecido que el enlace de hidrógeno es una fuerza de Van der Waals, dipolo-dipolo, pero de carácter muy fuerte pero más débil que los enlaces covalentes o iónicos. Este carácter fuerte del enlace de hidrógeno favorece el proceso de puente, aglomerando a las partículas coloidales en la molécula del polímero, favoreciendo la coagulación (Bolto y Gregory, 2007). Sin embargo, debe de tenerse cuidado con la dosis del coagulante que se agrega. De acuerdo con la investigación de Wang *et*

al. (2005), proponen tres zonas diferentes de coagulación al usar productos poliméricos que tienen que ver con la dosificación:

- Zona 1: no hay suficiente coagulante para desestabilizar los coloides.
- Zona 2: hay suficiente coagulante para desestabilizar los coloides.
- Zona 3: hay un exceso de concentración de coagulante, dando lugar a una reestabilización de partículas coloidales, no favoreciendo la coagulación.

De acuerdo a Andía (2000), Vargas (2004) y Weber (2003), el exceso de coagulante es adsorbido en la superficie de la partícula coloidal produciendo una inversión de carga, de negativa a positiva, lo que re-estabiliza las partículas coloidales.

2.7.1.1.3- Polímeros orgánicos naturales como coagulantes

De acuerdo con Williams (2007) el mecanismo de interacción entre coloides y polímeros orgánicos solubles (caso del mucílago de nopal) es principalmente por puenteo (Figura 2.9).

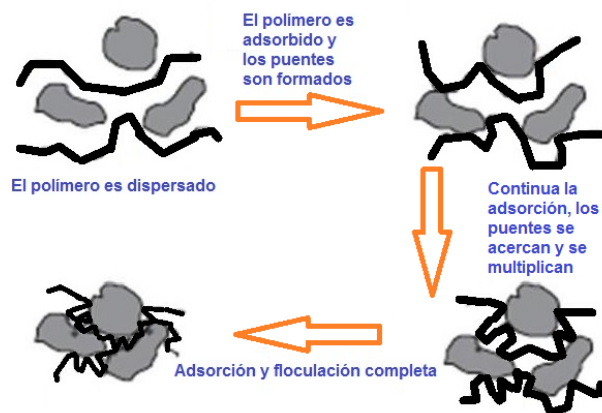


Figura 2.9. Mecanismo de interacción entre coloides y polímeros orgánicos naturales solubles

Cerón (2016) afirma que las cadenas poliméricas cargadas positivamente neutralizan la carga negativa de la MOD, permitiendo la precipitación de los flóculos producidos por puentes entre complejos de polímero-MOD (por ejemplo: complejo humato o fulvato-polímero).

2.7.1.1.4- Fases en la coagulación

El proceso se desarrolla en un tiempo muy corto -casi instantáneo- presentándose las siguientes fases (Lorenzo-Acosta, 2006):

1. Hidrólisis del coagulante y desestabilización de las partículas en suspensión.
2. Formación de compuestos químicos poliméricos.
3. Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
4. Asociación mutua de coloides.
5. Acción de barrido.

2.7.1.2.- Floculación

Después de la coagulación las partículas formadas -microflóculos- están en disposición de reunirse, esta aglomeración de las partículas descargadas, llamada flóculos, ayudada ahora por una agitación lenta, es el objetivo de la floculación. En la colisión entre las partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las superficies sólidas, las fuerzas de Van der Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión. La floculación está relacionada con los fenómenos de transporte de las partículas dentro del líquido, que son los que ocasionan el contacto de las partículas coaguladas para provocar colisiones entre ellas promoviendo su aglomeración. Estos flóculos inicialmente son pequeños, pero se juntan y forman aglomerados mayores capaces de sedimentar. El diámetro de los flóculos es variable, desde menos de 0.001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención).

La floculación consiste en la reunión de los coágulos formados, venciendo las fuerzas de repulsión y consiguiendo la precipitación. Este proceso requiere un cierto período de tiempo. La floculación requiere un menor gradiente de agitación para impedir el rompimiento y disgregación de los flóculos ya formados. Durante la coagulación dosis fuertes de coagulantes producen un exceso de lodos y no se conseguirá un precipitado que posea las características deseadas para una buena separación. Por estas razones, se ha recomendado el uso de floculantes y/o ayudantes de la floculación (polielectrolitos). En los procesos convencionales estos

suelen ser macromoléculas de polímeros orgánicos que favorecen la aglomeración de los flóculos a través de puentes. En la Tabla 2.6 se muestra la clasificación de los floculantes, sintéticos y naturales, según el carácter iónico de su grupo activo.

Tabla 2.6. Clasificación de floculantes

Polielectrolitos catiónicos*
Policloruro de amonio, epiclorfidrina/polímeros de dimetil amina, polisacáridos catiónicos, alquilaminas, derivados del poliestireno, polímeros de sulfonio y biopolímeros catiónicos naturales (chitosán y almidones).
Polielectrolitos aniónicos
Poliacrilamidas aniónicas, polímeros de ácidos carboxílicos, polímeros de ácidos fosfónicos, polímeros ácidos sulfónicos y polímeros naturales aniónicos (polisacáridos sulfonados, sulfonatos modificados de lignina).
Polímeros no aniónicos
Poliacrilamida**, poliaminas***, alcohol de polivinilo y biopolímeros naturales no iónicos (almidón, derivados de celulosa y alginatos).

*Peso molecular polímeros catiónicos: 10^4 - 10^6 g/mol. **Peso molecular poliacrilamidas: 2 a 4×10^6 g/mol. ***Peso molecular poliaminas: menor a 1×10^6 g/mol. Fuente: Renault *et al.* 2009

Para aumentar el material en suspensión se puede agregar arcilla, lo que favorece la floculación. Al usarse bentonitas o caolinitas se aumenta la frecuencia de colisiones y se aumenta el peso del flóculo (Lorenzo-Acosta, 2006). Márquez (1994) usó bentonita con el sulfato de aluminio en proporción 1:1, removiendo el 93% de turbiedad, de 36% a 88% del color aparente, y de 50% a 72% de la materia orgánica en aguas superficiales. Lainés *et al.* (2008) afirman que las arcillas son adsorbentes que pueden utilizarse para ayudar en la coagulación de aguas que contengan color intenso o baja turbiedad, como es el caso de los lixiviados muestreado del RSBP, y proporciona material suspendido adicional al agua en la que se pueden formar los flóculos. Estas partículas floculantes luego son capaces de sedimentarse rápidamente debido al alto peso específico de la arcilla.

2.7.1.2.1.- Calidad y tamaño de flóculos

Para evaluar la calidad de los flóculos formados se usa el índice de Willcomb, el cual clasifica los flóculos por su tamaño, tal como se indica en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Índice de Willcomb para caracterización de flóculo

Índice	Descripción
0	Flóculo coloidal, sin señal de aglutinación.
2	Visible. Flóculo muy pequeño, casi imperceptible.
4	Disperso. Flóculo bien formado, pero uniformemente distribuido con sedimentación lenta.
6	Claro. Flóculo de tamaño relativamente grande, precipita con lentitud.
8	Bueno. Flóculo que se deposita fácil, pero no completamente.
10	Excelente. Flóculo que se deposita completamente, dejando un líquido cristalino.

Fuente: Goirdani *et al.* (2008)

El diámetro de los flóculos es variable, desde menos de 0.001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de la mezcla y la floculación. Se observa el tamaño del flóculo producido y se evalúa cualitativamente según sus características (Vargas, 2004). Su tamaño podría expresarse en milímetros de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra (Figura 2.10).

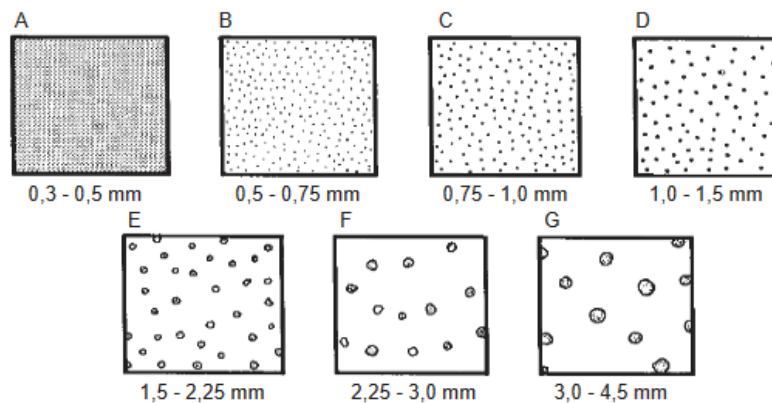


Figura 2.10. Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en el proceso de coagulación. Fuente: Vargas (2004)

En el proceso de crecimiento del flóculo intervienen tres mecanismos de transporte de las partículas y suceden en el siguiente orden (Vargas, 2004):

- **Floculación pericinética:** se trata del movimiento browniano (serie de colisiones y choques entre partículas) debido a la energía térmica del fluido que provoca un movimiento natural en las moléculas del agua.
- **Floculación ortocinética:** provocada por el movimiento inducido al agua por medios externos, mecánicos o hidráulicos, provocando que las partículas colisionen y se unan.
- **Floculación por agregación:** los flóculos previamente formados por la floculación pericinética y ortocinética, que al unirse ganan peso y tamaño, precipitan a mayor velocidad.

El gradiente de velocidad y el tiempo de retención son, los que, en forma conjunta, van a producir la mayor eficiencia, estos son llamados parámetros operacionales (Vargas, 2004). En el proceso de coagulación-floculación influyen una serie de factores químicos e hidráulicos que inciden en la selección del mejor coagulante y su dosis óptima, para lo cual es necesario hacer la “Prueba de Jarras”. La prueba de jarras es el método más utilizado para determinar la dosis de coagulante y parámetros asociados. El objetivo de la prueba es simular el proceso a gran escala de coagulación-floculación en el laboratorio (Sincero y Sincero, 2003).

2.7.1.3- Prueba de jarras

A pesar de que se conoce la teoría y las reacciones químicas que ocurren en la coagulación y la floculación, es necesario emplear una prueba práctica para la selección final de las condiciones del proceso. Esta prueba práctica se puede hacer de dos formas diferentes: la prueba de jarras y la prueba en planta piloto.

La prueba de jarras es útil cuando se requiere evaluar un gran número de condiciones y variables a pequeña escala y sin emplear altas cantidades de reactivos (Hendricks, 2006). Esta prueba es reconocida como la práctica más valiosa y común para simular el proceso de coagulación y floculación en laboratorio, es una prueba rápida, de bajo costo y de la cual se pueden obtener resultados aplicables al proceso a escala piloto y escala de proceso (Spellman, 2008; De Wolfe, *et al.*, 2003). Se usa para mejorar el desempeño de las plantas de tratamiento ya construidas y en el diseño de nuevas (AWWA, 2000; AWWA, 1990).

El objetivo de la prueba de jarras es simular, lo mejor posible, las condiciones deseadas en las instalaciones de coagulación-floculación. El procedimiento general para esta prueba consiste en una mezcla rápida, por alrededor de 10 segundos o menos, donde se agrega el coagulante, seguida de un periodo de mezcla lenta para simular la floculación, de 15 a 30 minutos. Los parámetros que pueden medirse como parte de la prueba son: turbiedad, color, DQO, DBO₅, sólidos suspendidos, volumen del lodo producido, entre otros (ASTM, 2003).

Existen diferentes metodologías propuestas para la realización de la prueba de jarras, sin embargo, debido a la cantidad de variables en la coagulación-floculación y a las diferentes calidades de agua que se pueden tener, la prueba de jarras seguirá siendo un método empírico y difícil de estandarizar (Hendricks, 2006; McEwen, 1997).

La prueba de jarras puede ser utilizada para generar datos a través de los cuales se puede obtener (Pizzi, 2005; AWWA; 2000; AWWA, 1990):

- Del coagulante y floculante
 - Selección del producto
 - Determinación de la dosis
- Determinación del pH óptimo (para diseño de experimentos)
- Determinación del tiempo de adición de los reactivos para ajustar el pH
- Optimización de la energía de mezclado (para diseño de experimentos)
- Optimización de tiempo para la mezcla rápida y la lenta (para diseño de experimentos).

La Figura 2.11 muestra el equipo común que se utiliza para la realización de la prueba de jarras. El aparato consiste en seis contenedores (comúnmente de un litro de capacidad), y en cada uno se ubica un agitador (que puede ser de paleta, de barra magnética o hélice). El equipo de prueba de jarras cuenta además con un

controlador de la velocidad de agitación del agua, lo que puede ayudar a simular las condiciones de mezclado reales a escala de planta. Las diferencias entre la capacidad de las jarras, su forma y el tipo de mezclador no tienen un impacto apreciable en el desempeño del aparato (Spellman, 2008; Bratby, 2006; Hendricks, 2006; Wang *et al.*, 2005).

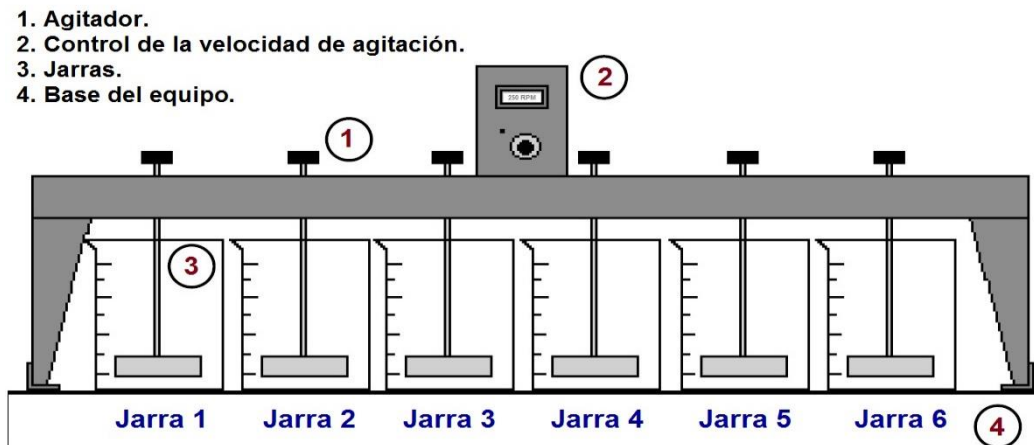


Figura 2.11 Equipo de prueba de jarras. Fuente: Adaptado de Trejo (2012)

2.8.- Lixiviados, manejo y gestión

Uno de los asuntos más importantes en la planeación, diseño, operación y clausura de los sitios de disposición final de RSU es el manejo de los lixiviados. Los lixiviados contienen varios contaminantes en concentraciones que pueden impactar negativamente el ambiente, afectando las aguas subterráneas y superficiales, amenazando la salud humana. Los lixiviados pueden ser extremadamente tóxicos por décadas o siglos, antes de que por sí mismos alcance niveles que no afecten al ambiente. Lo anterior justifica la importancia de un manejo adecuado, que incluya estrategias de planeación, opciones de tratamiento, de clausura y el saneamiento de los sitios de disposición final (Johannessen, 1999).

Las alternativas de manejo de lixiviados van desde la prevención de su generación hasta sistemas de tratamiento complicados. No debe de olvidarse que el principal objetivo en la gestión de lixiviados es asegurar que su manejo y disposición final no generen riesgo al ambiente o a la salud.

A lo largo del mundo se han desarrollado cuatro alternativas de manejo de lixiviados (Johannessen, 1999):

1.- Encapsulamiento y contención total. Conocido como relleno seco, involucra prevenir la generación de lixiviados por la percolación de agua a través de los RSU con una capa de material impermeable en la parte superior del relleno. Esta alternativa solo se recomienda para sitios con clima seco, ya que, aunque se considera que los residuos están encapsulados, eventualmente puede haber fallas en el sistema, provocándose dispersiones no controladas.

2.-Contenido, almacenamiento y disposición de los lixiviados. Alternativa mejor conocida como relleno sanitario tradicional, en donde los lixiviados son colectados por sistemas de drenaje dentro de la capa impermeable, conduciéndolos o bombeándolos a sistemas de tratamiento, antes de su descarga final a un cuerpo de agua. La tasa de formación de lixiviados depende de las condiciones meteorológicas, del nivel de escurrimiento del agua a través de los RSU y de las características de la tapa de material que cubra los residuos. En esta opción existe a la alternativa de recircular los lixiviados generados, para favorecer la estabilización y mineralización de los RSU. Esta alternativa de manejo tiene una vida útil de 30 a 35 años antes de su clausura definitiva y puede ser considerada el primer paso hacia un aceptable manejo de los lixiviados.

3.- Solución de control de contaminantes. Es esta alternativa se pretende que los lixiviados se mantengan en cantidad y calidad todo el tiempo en niveles aceptables, sin afectar al ambiente o la salud humana y sin entradas de energía o de requerimientos de mantenimiento en las instalaciones. Se deben evaluar los impactos ambientales y determinar la solución aceptable para la cantidad y características de los lixiviados generados. Esta alternativa de manejo se recomienda en condiciones de alta humedad, en donde el almacenamiento, recolección y depósito puede ser el primer paso de gestión. Se busca que se produzca el tiempo de estabilización del sitio de disposición

final, produciendo biogás (metano y dióxido de carbono, principalmente) por lo que se requerirá mantenimiento a la capa de material inerte que cubre el sitio, así como adecuar los sistemas de drenaje. A largo plazo es posible colocar vegetación superficial con un alto potencial de evapotranspiración.

4.-Contaminantes sin restricciones. En esta alternativa no se toma ninguna medida para prevenir o reducir la formación de lixiviados. Esta opción se aplica a RSU que sean totalmente inertes, como por ejemplo escombros producto de construcción o derrumbes. Esta alternativa está limitada a climas áridos y nunca en condiciones húmedas.

En relación a los lixiviados existen varias alternativas de tratamiento: reciclado al relleno sanitario, depósito en lagunas de evaporación, coagulación-floculación, precipitación química, adsorción, oxidación química, inyección de aire, ultrafiltración, microfiltración, nanofiltración, ósmosis inversa; sin olvidar los tratamientos biológicos -cuando las características de los lixiviados lo permitan-. Como una alternativa adicional se incluye la combinación de los lixiviados con los influentes de la plantas de tratamiento de aguas municipales (Renou y Givaudan, 2008).

En México el tratamiento a los lixiviados es cuestionable. Los tratamientos más usados son la recirculación y la evaporación. La efectividad de ambos procesos se encuentra a discusión debido a la generación de aerosoles y de otros compuestos peligrosos que afectan la salud de los trabajadores y a la vegetación de la zona (Gray *et al.*, 2005). Se sumarían los problemas causados por la sobreproducción de lixiviados en época de lluvias y el requerimiento de grandes superficies para su manejo (Méndez *et al.*, 2004).

2.9.- Normativa de lixiviados en México

El marco normativo en materia de protección ambiental inicia en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, artículo cuarto, en dónde se menciona:

Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley (Diputados LXII Legislatura, 2015a).

Específicamente en el tema de lixiviados no existe normativa vigente en México. En vista a la ausencia de una normativa específica surge la necesidad de considerar a los lixiviados, normativamente hablando, como agua residual con necesidad de tratamiento, para poder entonces referenciarlos a algún reúso, o bien para poder establecer límites máximos permisibles antes de descargarlos a un cuerpo de agua. La Tabla 2.8 incluye las normas vigentes relativas a agua residual y agua residual tratada; incluyendo las normas vigentes para sitios de disposición final y sobre residuos peligrosos.

Tabla 2.8. Normativa en México relativa a aguas residuales, sitios de disposición final y residuos peligrosos

Norma	Descripción	Fecha de publicación
NOM-001-SEMARNAT-1996.	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales (DOF, 1997).	6-enero-1997.
NOM-002-SEMARNAT-1996.	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (DOF, 1998a).	3-junio-1998.
NOM-003-SEMARNAT-1997.	Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al público (DOF, 1998b).	21-septiembre-1998.
NOM-083-SEMARNAT-2007.	Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, <i>monitoreo</i> , clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial (DOF, 2004).	20-octubre-2004.
NOM-052-SEMARNAT-2005.	Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y listados de residuos peligrosos (DOF, 2006).	23-junio-2006.

El tema de lixiviados es mencionado en la LGPGIR en su artículo 5º, fracción XVI, definiéndolo y estableciéndolos como un contaminante de suelo y de cuerpos de

agua, provocando su deterioro y representando un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos (Diputados LXII Legislatura, 2015b).

2.10.- Normativa internacional de lixiviados

En virtud de la ausencia de una normativa de lixiviados en México, en la Tabla 2.9 se muestra la normativa existente en Estados Unidos de América, Alemania y Francia.

Tabla 2.9. Comparación de límites de descarga de lixiviados en el ámbito internacional

Límites máximos de descarga			
Parámetro	Lixiviados (mg/L)		
	EU ⁽¹⁾	Alemania ⁽¹⁾	Francia ⁽¹⁾
DQO	NE	200	120
DBO ₅	NE	20	20
NH ₄ -N	NE	NE	NE
N Total	NE	70	70
Fósforo	NE	3	3
Cd ²⁺	0.01	0.1	0.1
Cr ³⁺	NE	0.5	0.5
Cr ⁶⁺	0.05	0.1	0.1
Ni ²⁺	0.013	1	1
Pb ²⁺	0.03	0.5	0.5
Cu ²⁺	0.07	0.5	0.5
Zn ²⁺	0.3	2	2
Ag ²⁺	0.05	NE	NE
Color	NE	NE	**

Unidades en mg/L. **EU**: Estados Unidos de América. **NE**: No establecido. ******: No debe causar cambios de color en la fuente receptora. **(1)**: Requerimientos para descarga en ríos. Fuente: Adaptado de Kurniawan *et al.* (2006)

Se puede observar que de las tres normatividades la más exigente es la de Francia y la más laxa es la de Estados Unidos de América.

2.11.- Análisis proximal

El análisis proximal se aplica en primer lugar a los materiales que se usarán para formular una dieta como fuente de proteína o de energía, y a los alimentos terminados, como un control para verificar que cumplan con las especificaciones o

requerimientos establecidos durante la formulación. Estos análisis indican el contenido de humedad, proteína cruda, fibra cruda, lípidos crudos, ceniza y carbohidratos -o extracto libre de nitrógeno- en la muestra (AOAC, 1990).

El mucílago de nopal es susceptible de este tipo de análisis. El análisis proximal incluye las determinaciones de humedad proteína cruda, lípidos crudos, fibra cruda, ceniza y carbohidratos.

3. ANTECEDENTES

3.1.- Caracterizaciones previas de lixiviados en el RSBP

En el año 2014 el Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó caracterizaciones de los lixiviados generados en las cuatro etapas del RSBP (Alcantar, 2016), obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Caracterización IIUNAM de los lixiviados en las cuatro etapas del RSBP

Mediciones	Parámetro	Unidad	Etapa I		Etapa II		Etapa III		Etapa IV	
Campo	Fecha (2014)	Día/mes	19/05	31/07	19/05	31/07	19/05	31/07	19/05	31/07
	pH	-	8.73	8.13	8.01	8.10	7.79	7.83	8.08	8.03
	T	°C	18	21	23	23	22	22	21	24
	CE	mS/cm	2.82	1.27	3.89	4.16	3.85	3.64	4.96	4.70
Laboratorio	DQO	mg/L	2,126	668	1,966	2,441	2,082	2,786	7,296	7,838
	DBO ₅	mg/L	35	37	79	202	76	109	250	370

IIUNAM: Instituto de Ingeniería de la UNAM. **T:** Temperatura. **CE:** Conductividad eléctrica. Fuente: Alcantar (2015), con datos generados por el IIUNAM en el año 2004

Alcantar (2015) realizó en el año 2014 la caracterización de lixiviados en las cuatro etapas del RSBP, obteniendo valores promedio de parámetros mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Caracterización de los lixiviados en las cuatro etapas del RSBP

Medición	Parámetro	Unidad	Promedio			
			Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV
Campo	pH	-	8.2	8.1	8.2	8.0
	Temperatura	°C	19.6	22.7	19.5	22.7
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	25,549	27,597	18,339	33,260
Laboratorio	Sólidos Sedimentables	mL/L	0.41	300	0.9	0.7
	Sólidos Totales	mg/L	15,742	15,150	11,213	18,921
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	2,450	2,631	1,573	3,595
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	13,272	12,460	9,848	14,859
	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	151.0	383	109	304

Fuente: Alcantar (2015), con datos del año 2014

Tabla 3.2. Caracterización de los lixiviados en las cuatro etapas del RSBP (continuación)

Medición	Parámetro	Unidad	Promedio			
			Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV
Laboratorio	Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	118.1	451	78	207
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	15,643	14,683	11,517	18,425
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	2,440	2,611	1,625	3,807
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	13,190	12,082	9,870	14,570
	Grasas y Aceites	mg/L	117	151	105	165
	DQO	mg O ₂ /L	2,910	3,620	1,492	5,127
	DBO ₅	mg/L	329	557	184	608
	Nitrógeno total*	mg/L	782	1,062	542	1,464
	Nitrógeno amoniacal*	mg/L	142	286	268	344
	Nitrógeno Orgánico*	mg/L	596	785	294	1,691
	Peso específico*	mg/L	1.02	1.02	1.01	
	Cloruros*	mg/L	5,285	3,834	3,955	5,127
	Carbonatos*	mg/L	768	1,081	554	608
	Bicarbonatos*	mg/L	7,920	9,772	6,483	1,464
	Alcalinidad*	mg/L	8,695	10,854	7,038	344
	Orto fosfatos (como P) *	mg/L	11.3	18.6		1,691

*: Estos parámetros se evaluaron de manera esporádica. Fuente: Alcantar (2015), con datos del año 2014

Además, Alcantar (2015) proporciona valores históricos de parámetros, mínimos y máximos, de la caracterización de lixiviados de la etapa III del RSBP, durante el periodo comprendido de los años 1996 al 2014, valores registrados en la Tabla 3.3.

3.2.- Sistemas de tratamientos de lixiviados usados actualmente en el RSBP

El RSBP consta de cuatro etapas que en total superan las mil hectáreas de superficie. La primera etapa, clausurada en 1992, ocupa una superficie de 70 ha, en donde se producen alrededor de 25 m³/día de lixiviados. Estos lixiviados son tratados por un proceso físicoquímico de coagulación-floculación (usándose cloruro férrico) en una planta ubicada en el mismo relleno sanitario.

Tabla 3.3. Valores mínimos y máximos de parámetros característicos en la etapa III del RSBP

Etapa III						
	Parámetros	Unidades	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Campo	pH		6.4	9.9	8.3	0.43
	Temperatura	°C	10	30	19.51	2.3
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	40	47,515	18,339	12.11
Laboratorio	Sólidos Sedimentables	mL/L	0	20.1	0.95	2.18
	Sólidos Totales	mg/L	67	52,590	11,213	7.03
	Sólidos Totales Volátiles	mg/L	0	9,030	1,574	947
	Sólidos Totales Fijos	mg/L	86	53,300	9,848	6,517
	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	0	640	110	80
	Sólidos Suspendidos Volátiles	mg/L	0	1,500	42	77
	Sólidos Suspendidos Fijos	mg/L	0	1,040	78	81
	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	55	118,515	11,518	8,702
	Sólidos Disueltos Volátiles	mg/L	0	50,530	1,626	2,204
	Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	490	116,525	9,871	7,720
	Grasas y Aceites	mg/L	9	2,001	105	142
	DQO	mg O ₂ /L	17	6,547	1,493	1,240
	DBO ₅	mg/L	7	1,925	184	230
	Nitrógeno total	mg/L	18	1,856	543	551
	Nitrógeno amoniacal	mg/L	1	1,652	268	505
	Nitrógeno Orgánico	mg/L	0	1,102	294	292
	Peso específico	mg/L	1	1.02	1.01	0.01
	Cloruros	mg/L	366	9,430	3,955	1,992
Carbonatos	mg/L	60	1,097	555	388	
Bicarbonatos	mg/L	2,084	8,945	6,484	3,335	
Alcalinidad	mg/L	2,144	10,042	7,038	3,691	
Relación (DBO ₅ /DQO)	mg/L	0.40	0.30	0.12	0.20	

Fuente: Alcantar (2015), periodo de los años 1996 al 2014, datos recopilados en el año 2014

Esta planta de tratamiento inició operaciones en 1994, tiene una capacidad de tratamiento de 25 m³/día, con concentraciones promedio en el influente de DBO₅ y DQO de 675 y 3500 mg/L, respectivamente, obteniéndose de 4 a 5 m³/día de lodos, que después de ser centrifugados se depositan en la cuarta etapa del mismo relleno sanitario. Los lixiviados generados, ya tratado, se utilizan para el riego de caminos internos (Alcantar, 2015).

En las etapas II, III, y IV del RSBP el tratamiento a lixiviados se da a través de lagunas de evaporación y recirculándolos a los residuos dentro de las celdas. En junio de 2008 llegó a probarse en una fracción de los lixiviados generados el sistema de ósmosis inversa; sin embargo, al implementar el proceso fue notorio su elevado costo y su capacidad limitada de tratamiento (Nájera *et al.*, 2010).

3.3.- El nopal en México

En general los denominados nopales, una especie endémica de América, son tallos de plantas pertenecientes al género *Opuntia* de la familia de las *Cactáceas*, los cuales están formados por varias especies. Los nopales se encuentran ampliamente distribuidos en el continente americano en regiones áridas, semiáridas y tropicales. México cuenta con más de 100 especies del género *Opuntia* y es en las zonas semiáridas donde existe la variación más amplia (Sáenz *et al.*, 2006). El subgénero *Platyopuntia* agrupa a las especies del género *Opuntia* que presenta tallos aplanados -penca, cladodios o raquetas- (INECC, 2007).

México es el país con mayor diversidad y producción de nopales en el mundo. Los nopales silvestres tienen su centro de distribución en los Estados de San Luis Potosí, Zacatecas y Aguascalientes; sin embargo, se han extendido hacia el norte y sur. El área de producción más importante es la Ciudad de México, específicamente la región de Milpa Alta, que representa el 80% del volumen de la producción nacional; siguiéndole en orden de importancia San Luis Potosí, Oaxaca, Michoacán y Jalisco. (Morán, 2013).

La fabricación de productos elaborados con nopal ha aumentado debido al incremento considerable de la demanda, debido al auge de los patrones naturistas de consumo (Morán, 2013). El nopal tiene diferentes usos: alimento, forraje, conservación del suelo, cerco vivo, encurtido, aditivo en concreto, producción de biogás, artesanías a base de cladodios lignificados, fabricación de: bebidas alcohólicas, dulces (mermeladas, jugos, néctares, productos deshidratados y jarabes), harinas, cosméticos, shampoo, acondicionadores, jabones, cremas, lociones, mascarillas, geles, repelente de insectos, colorantes, gomas y productos

medicinales. entre otros usos (Abraján, 2008). En la Figura 3.1 se muestra de producción a nivel nacional de nopal de los años 2000 al 2010.

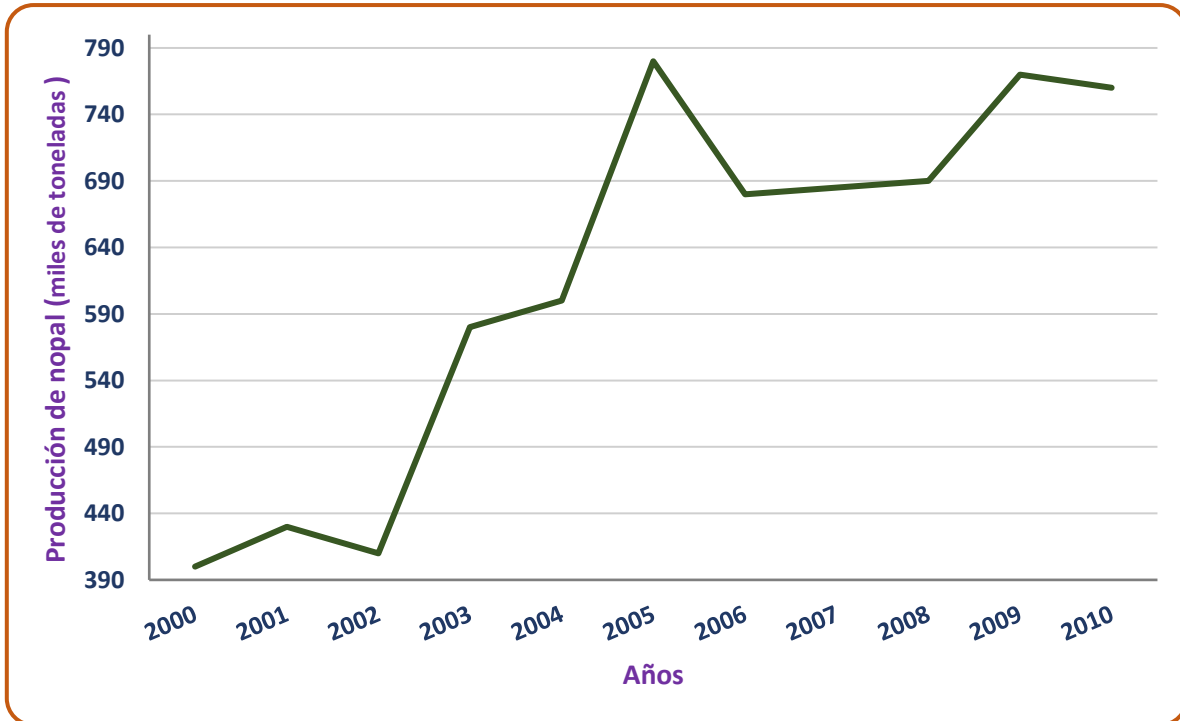


Figura 3.1. Producción nacional de nopal en México. Fuente: SINAREFI (2016)

El nopal es el principal cultivo de la Ciudad de México, su producción ocupa un área aproximada de cuatro mil hectáreas. En el año 2011 se tenían registrados cinco mil productores. La especie que se produce a nivel comercial en la zona central de México es *Opuntia ficus-indica*.

Una penca de nopal que produce nopales aptos para la venta debe tener de 1 a 2 años. Los nopales deben tener un mínimo 30 cm de largo y 20 cm de ancho, ser plantas de buen grosor y succulencia, que presente el corte en la parte de unión con la planta madre (INECC, 2007). Dentro de la composición química del nopal se encuentra un alto contenido de agua (90 al 92.5%). El nopal contiene en varias proporciones, glúcidos o carbohidratos y componentes nitrogenados (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Composición química del nopal fresco

Parámetro	Contenido *
Porción comestible	78 g
Energía	27 kcal
Proteínas	1.70 g
Grasas	0.30 g
Carbohidratos	5.60 g
Calcio	93 mg
Hierro	1.60 mg
Tiamina	0.03 mg
Rivoflavina	0.06 mg
Niacina	0.03 mg
Ácido ascórbico	8 mg

*: Contenidos en 100 g de nopal fresco. Fuente: De la Rosa y Santana, 2001

El contenido de los macrocomponentes en el nopal cambia con su edad (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Composición química de pencas de nopal en distintas edades

Edad	Proteína	Grasa	Cenizas	FC	ENN
0.5	9.4	1.00	21.0	8.0	60.6
1.0	5.4	1.29	18.2	12.0	63.1
2.0	4.2	1.40	13.2	14.5	66.7
3.0	3.7	1.33	14.2	17.0	63.7
4.0	2.5	1.67	14.4	17.5	63.9

FC: Fibra cruda. **ENN:** Extractos no nitrogenados. Datos en porcentaje de materia seca. Fuente: Sáenz *et al.* (2006)

En la Ciudad de México existe una gran producción de este vegetal, principalmente en la Delegación Milpa Alta, en la cual se encuentra establecido el Centro de Acopio del Nopal, en el que se congrega el mayor número de productores de la Ciudad de México. Aquino (2015) estima que en el mencionado establecimiento se generan diariamente cuatro toneladas de residuos de nopal, de las cuales tan solo dos toneladas al día se aprovechan en la elaboración de composta, desechándose el resto, sin una oportunidad alguna de aprovechamiento adicional (Figura 3.2).



Figura 3.2. Fotografía de los residuos orgánicos generados en el Centro de Acopio del Nopal, Milpa Alta, Ciudad de México

3.4.- Investigaciones relacionadas

3.4.1.- Coagulantes inorgánicos

El tratamiento de lixiviados mediante el proceso de coagulación usando compuestos inorgánicos ha sido explorado extensamente con anterioridad. En la Tabla 3.6 se mencionan algunas investigaciones relacionadas y sus resultados.

Cuando se realizó una comparación entre el cloruro férrico y otros coagulantes inorgánicos, el cloruro férrico obtuvo mejores resultados en la depuración de lixiviados. Aziz *et al.* (2007) afirma una supremacía del cloruro férrico sobre otros coagulantes inorgánicos en la remoción de materia orgánica. La mayor efectividad del cloruro férrico en el proceso de coagulación-floculación puede ser atribuida al hecho de que las partículas coloidales precipitan mejor en cargas electrostáticas más altas (Rigola, 1999). Por esta razón el hidróxido complejo formado por el Fe^{3+} puede ser más eficiente que el hidróxido complejo formado por otros coagulantes. De esta forma el hidróxido insoluble formado por el Fe^{3+} atrapa las partículas

coloidales ya neutralizadas, facilitando su remoción (Nájera *et al.*, 2011). Esto explica también porque los flóculos formados con el uso cloruro férrico son más grandes que los de otros coagulantes inorgánicos (Soto *et al.*, 2004).

Tabla 3.6. Investigaciones sobre el tratamiento de lixiviados con proceso de coagulación usando coagulantes químicos.

Autor(es)	Coagulante usado	Aplicado en	Resultados
Amokrane <i>et al.</i> (1997).	Sulfato de aluminio y cloruro férrico.	LRS	97% de remoción de turbidez como pretratamiento en combinación con ósmosis inversa.
Tatsi <i>et al.</i> (2003).	Cloruro férrico, sulfato de aluminio y cal.	LRS	80% de remoción de DQO usando cloruro férrico.
Ntampou <i>et al.</i> (2006).	Cloruro férrico y Policloruro de aluminio.	LRS	73% de remoción de DQO en un proceso combinado de coagulación y ozonificación.
Aziz <i>et al.</i> (2007).	Sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico.	LRS	Cloruro férrico es el coagulante con mejores resultados a 2500 mg/L. removiendo 47% de DQO.
Lainés <i>et al.</i> (2008).	Cloruro férrico y sulfato de aluminio.	LRS	60% y 40% de remociones de color y DQO con cloruro férrico a 375 mg/L.
Nájera <i>et al.</i> (2009).	Cloruro férrico y sulfato ferroso.	LRS	67% de remoción de DQO a 1.4 g/L de cloruro férrico.
Nájera <i>et al.</i> (2011).	Cloruro férrico y sulfato ferroso.	LRS	66% de remoción de DQO usando cloruro férrico con un proceso combinado de coagulación con oxidación Fenton.
Lozano-Rivas (2012).	Cloruro férrico.	LRS	90% y 56% de remociones de turbiedad y DQO usando 2 g/l de cloruro férrico.

LRS: Lixiviados de relleno sanitario

3.4.2.- Coagulantes orgánicos sintéticos

Los coagulantes orgánicos sintéticos son moléculas de cadenas largas formadas de unidades químicas -monómeros- que se repiten en toda la extensión del polímero. Estas unidades generalmente son iónicas e imparten al polímero una carga eléctrica, por lo que comúnmente son llamados polielectrolitos. Tiene aplicaciones en el tratamiento del agua como coagulante, floculantes y acondicionadores de

lodos. Su uso como coagulante no produce gran cantidad de lodos en comparación a los coagulantes inorgánicos (Hendricks, 2006).

Los polímeros se pueden clasificar de acuerdo con su carga en catiónicos, aniónicos y no iónicos. Los aniónicos son aquellos que presentan sitios cargados negativamente, se utilizan para enlazar partículas y así aglomerarlas. En el caso de los polímeros no iónicos su función principal es crear puentes entre las partículas, ayudándolas a aglomerarse. Como una medida de la longitud del polímero puede utilizarse el peso molecular y este puede variar como lo muestra la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Clasificación de polímeros sintéticos de acuerdo con su peso molecular

Clasificación	Peso molecular (g/mol)	Usos
Bajo	10^4 - 10^5	Coagulante-floculante.
Medio	10^5 - 10^6	Coagulante-floculante.
Alto	10^6 - 5×10^6	Floculante/Espesante de lodos.
Muy alto	$>5 \times 10^6$	Floculante/Espesante de lodos.

Fuente: Bolto y Gregory (2007)

Los polímeros catiónicos de bajo y medio peso molecular se pueden utilizar como sustitutos de coagulantes inorgánicos, funcionando como neutralizadores de carga. En cambio, los polímeros de alta a muy alto peso molecular permiten la formación de enlaces entre los microfloculos, floculos y partículas, se usan como ayudantes de coagulación (Hendricks, 2006). En la Tabla 3.8 se presentan las principales características de los polímeros orgánicos más comúnmente utilizados en el tratamiento de agua.

3.4.3.- Coagulantes orgánicos naturales

Tradicionalmente, se han utilizado sales de hierro o aluminio y polímeros sintéticos, en el proceso de coagulación-floculación, los cuales generan lodos poco biodegradables. Los polímeros orgánicos naturales se han usado por más de 4,000 años en la India, en África y en China, como coagulantes eficientes y como ayudantes de coagulación de aguas con alta turbidez para uso doméstico en áreas rurales (Asrafuzzaman *et al.*, 2011). En esas regiones, se han usado plantas nativas, como las semillas del árbol de Nirmali - *Strychnos potatorum*, granos

tostados de maíz -*Zea mays*- o savia del cactus *Opuntia ficus-indica* (Sciban *et al.*, 2005).

Tabla 3.8. Coagulantes orgánicos sintéticos usados en el tratamiento de agua

Tipo	Ejemplo	Peso molecular (g/mol)	Dosis típicas	Usos	Observaciones
Catiónico	Poliamina $\left[-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{NH} - \right]_n -$	$10^4 - 10^7$	0.5-10	Coagulante y floculante	Reacciona con el cloro.
	PolidADMAC 	$10^4 - 10^6$	0.5-1.0	Coagulante, remoción color y turbiedad	Uso común como coagulante.
Aniónico	Poliacrilamida parcialmente hidrolizada 	$10^4 - 10^7$	0.1-1.0	Floculante	Producto de hidrólisis controlada de la poliacrilamida.
No iónico	Poliacrilamida 	$10^5 - 10^7$	0.1-1.0	Floculante	Incrementa la resistencia de los flóculos.

Fuente: Hendricks (2006), McEwen (1997), Tillman (1996), Montgomery (1985)

En los últimos años los materiales biopoliméricos han pasado a ser una alternativa viable y natural como coagulante y floculante. Los biopolímeros o polímeros naturales se producen por los organismos vivos y presentan ventajas respecto a los materiales tradicionales (coagulantes inorgánicos y sintéticos orgánicos): bajo impacto ambiental, bajo consumo energético en su producción o acondicionamiento, biodegradabilidad, estatus de recurso renovable, producción de lodos más biodegradables y se evita ajustar el pH de los efluentes tratados (Zamudio, 2014). Ejemplos de estos productos son las gomas de origen vegetal, tales como las pectinas, almidones galactomananas (polisacaridos neutros solubles en agua extraídos de semillas de leguminosas) y exudados -gomas de guar y de algarrobo- (Figura 3.3).

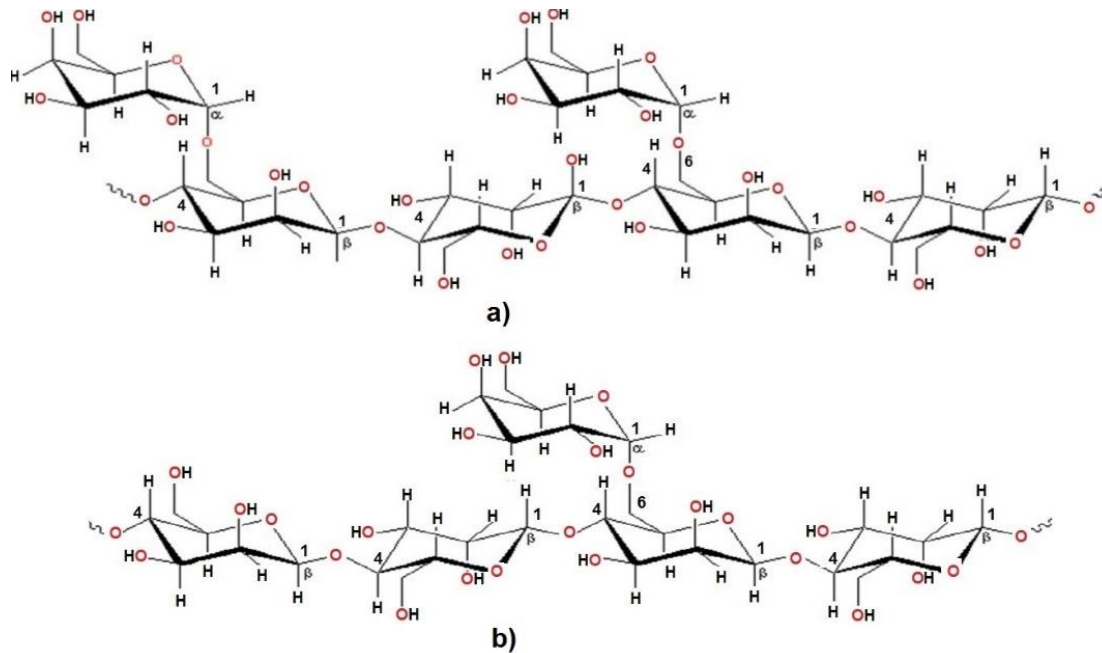


Figura 3.3. Estructura química de algunos de biopolímeros. **a)** Goma de guar, **b)** Goma de algarrobo. Fuente: Carpinteyro (2011)

Los polímeros orgánicos naturales no tienen un peso molecular tan alto como los polímeros sintéticos. Estos biopolímeros pueden presentar iguales o mejores eficiencias de remoción de carga orgánica que los productos sintéticos (Carpinteyro, 2011); además, su uso como alternativa de tratamiento tiene algunas ventajas en comparación a los coagulantes y floculantes químicos (Bolto y Gregory, 2007):

- Se requieren dosis bajas.
- Se producen menos lodos.
- Es poco el incremento en la carga orgánica del agua tratada.
- Ahorro en costos hasta del 30%.

Se han desarrollado investigaciones buscando demostrar la efectividad del uso de coagulantes y floculantes de origen natural, como una alternativa a los coagulantes y floculantes químicos (Tabla 3.9).

Tabla 3.9. Investigaciones relacionadas a coagulantes orgánicos naturales

Autor (es)	Biopolímero usado	Aplicaciones	Resultados
Bolto y Gregory (2007).	Chitosán (polímero N-acetil- α -D-glucosamina).	Purificación de agua.	Remueve MON, opera a través de enlace de hidrógeno entre los grupos amino libres del biopolímero y los grupos alifáticos e hidroxilos aromáticos de la MON.
Solís <i>et al.</i> (2012).	Almidón de yuca.	Agua de río.	Mezcla coagulante de sulfato de aluminio con almidón de yuca con remoción de más del 90% de color y turbiedad.
Miller <i>et al.</i> (2008).	Extracto de Moringa oleifera (árbol del norte de la India).	Agua para consumo humano.	Reducción de más del 90% de turbidez a través del mecanismo de neutralización de carga.
Lozano-Rivas (2012).	Extracto de fique (<i>Furcraea</i> sp.).	Lixiviados.	Mezcla coagulante de 3 g/L de cloruro férrico y 40 mg/L de extracto de fique, removiendo 61% DQO.
Ozacar y Sengil (2003).	Taninos de Turkish Acorns (roble).	Agua sintética.	Funciona como coadyuvante de coagulación en combinación con sulfato de aluminio.
Sciban <i>et al.</i> (2005).	Cepas de frijoles.	Agua sintética.	Potencial del coagulante orgánico como clarificador de agua.
Carpinteyro (2011).	Gomas de guar y algarrobo.	Agua residual municipal.	Remoción de 52% de DQO usando coagulantes naturales a 300 mg/L.

3.6.4.- Mucílago de nopal

En las pencas o cladodios de los nopales se encuentra agua retenida en un entramado de carbohidratos llamado mucílago. El mucílago es elaborado por el nopal a partir de ácidos orgánicos y es un hidrocoloide que tiene características higroscópicas (INECC, 1994; Nobel *et al.*, 1992).

Se han realizado diversas investigaciones acerca de la estructura y composición del mucílago de nopal. En la Tabla 3.10 se hace referencia a las que han llegado a conclusiones acerca de su estructura o composición. En la Tabla 3.11 se muestran los monómeros presentes en el mucílago de diferentes especies de *Opuntia*, incluyendo su peso molecular.

Tabla 3.10. Investigaciones relacionadas a la estructura y composición del mucílago de nopal

Autor	Conclusión
Saag <i>et al.</i> (1975)	Es un polisacárido que contiene ramnosa, arabinosa, galactosa y xilosa.
Bravo (1978)	Es un carbohidrato complejo que contiene monosacáridos, disacáridos y polisacáridos que contiene D-galactosa, L-arabinosa, D-xilosa y L-ramnosa y ácido D-galacturónico
Trachtenberg y Mayer (1981)	Está presente como su sal de calcio en las células del parénquima de la penca
Morel <i>et al.</i> (1986)	Es un polisacárido de alto peso molecular que contiene arabinosa, xilosa y ácido galacturónico
Gibson (1986)	Es un herero polisacárido de alto peso molecular con cerca de 30,000 subunidades de arabinosa (35-45%), galactosa (20-25%), ramnosa (7-8%), xilosa (7-8%) y ácido galacturónico (19-31%)
Cárdenas <i>et al.</i> (1998)	Es un polisacárido soluble en agua con potencial de floculación.
Cárdenas <i>et al.</i> (1999)	Es un arabinogalactano ramificado que presenta una fracción sin carga compuesta por arabinosa (42.5%), galactosa (26%), glucosa (2.5%) y xilosa (26%)
Goycoolea y Cárdenas (2003)	Es un carbohidrato que incluye galactosa, arabinosa, xilosa y ramnosa. La proporción varía de acuerdo con las condiciones ambientales, variedad y edad de la planta así como el procedimiento de extracción
Sepúlveda <i>et al.</i> (2007); Miretzky <i>et al.</i> (2008); Miller <i>et al.</i> (2008)	Su estructura se asemeja a las pectinas
Rodríguez <i>et al.</i> (2012)	Polisacárido altamente fibroso, altamente ramificado, con azúcares y ácidos urónicos

Goycoolea y Cárdenas (2003) definieron la estructura del mucílago de nopal (Figura 3.4).

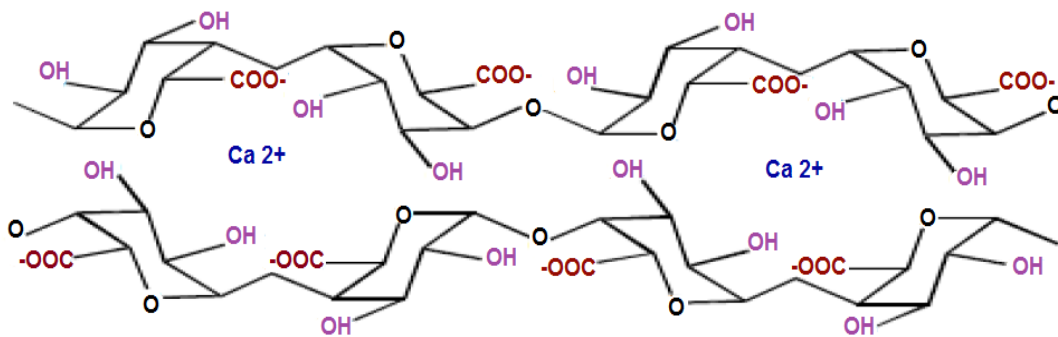


Figura 3.4. Estructura química del mucílago de nopal.
Fuente: Goycoolea y Cárdenas (2003)

Estudios realizados por Saenz y Sepulveda (1993) indican que en las pencas existe 1.2% de mucílago. En la Tabla 3.12 se muestra la composición química promedio del mucílago *Opuntia ficus-indica*, de acuerdo al estudio realizado por Sepulveda *et al.* (2007), usándose como solvente etanol e isopropanol.

Tabla 3.11. Presencia de monómeros y peso molecular en mucílago de *Opuntia ficus-sp.*, según diferentes estudios

Autor	PM	Gal	Ram	Ara	Xil	Uro
Srivastava <i>et al.</i> (1974) *	ND	+	-	+	-	-
Saag <i>et al.</i> (1975) *	ND	+	+	+	+	+
Paulsen y Luna (1979)	ND	+	+	+	+	+
McGarvie y Parolis (1979b)	ND	+	+	+	+	+
Trachtenberg y Mayer (1982)	4.30 X 10 ⁶	+	+	+	+	+
McGarvie y Parolis (1979a)	ND	+	-	+	+	-
McGarvie y Parolis (1981)	ND	+	+	+	+	+
Trachtenberg y Mayer (1981)	1.56 x 10 ⁶	-	-	-	-	-
Nobel <i>et al.</i> (1992)	ND	+	+	+	+	+
Sáenz y Sepúlveda (1993)	ND	+	+	+	+	+
Forni <i>et al.</i> (1994)	ND	+	-	+	+	+
Cárdenas <i>et al.</i> (1998)	3.00 x 10 ⁶	-	-	-	-	-
Medina-Torres <i>et al.</i> (2000)	2.30 x 10 ⁶	+	+	+	+	+
Cárdenas <i>et al.</i> (2008)	ND	+	+	+	+	-
Majdoub <i>et al.</i> (2001a)	6.92 x 10 ⁶	+	+	+	+	+
Majdoub <i>et al.</i> (2001b)	2.25 x 10 ⁶	-	+	-	-	+
Habibi <i>et al.</i> (2004)	ND	+	+	+	+	+

PM: Peso molecular en g/mol. **Gal:**galactosa. **Ara:**arabinosa. **Xil:**xilosa. **Uro:**ácido galacturónico. **+**: indica presencia del monómero. **-:** Indica ausencia del monómero. **ND:** No determinado. Fuente: La indicada en la Tabla y **Citados por Sáenz *et al.* (2006)

Rodríguez *et al.* (2012) y Gibson (1986) afirman que debido a su conformación polimérica y sus propiedades reológicas y funcionales los mucílagos representan compuestos de gran interés para la investigación y desarrollo de productos. El mucílago es un hidrocoloide con un alto poder espesante y coagulante que ha sido estudiado en diferentes investigaciones: Cárdenas *et al.*(1998), Medina-Torres *et al.* (2000), Medina-Torres *et al.* (2003), Sepúlveda *et al.* (2003) y Cárdenas *et al.*

(2008). Se ha reportado que el nopal tiene propiedades coagulantes (Zhang *et al.*, 2006; Miller *et al.*, 2008).

Tabla 3.12. Composición química del mucílago de nopal

Solvente usado en extracción	Humedad	Proteína	Cenizas	Nitrógeno	Ca	K
Etolol	4.9±0.6	7.9±1.5	36.2±2.3	1.3±0.2	10.9±0.7	1.6±0.2
Isopropanol	5.5±1.1	6.1±0.7	39.1±2.4	1.0±0.1	12.7±0.1	2.0±0.3

Datos en gramos por cada 100 g de muestra. Fuente: Sepúlveda *et al.* (2007)

El mucílago de nopal contiene complejas sustancias poliméricas de naturaleza de carbohidratos. (Ríos y Quintana, 2004). El mucílago de nopal tiene una composición polimérica lineal formada de polisacáridos que favorecen el proceso de coagulación en el tratamiento de lixiviados (Figueroa *et al.*, 2011). Se han desarrollado diversas investigaciones sobre el uso del mucílago de nopal como coagulante, en la Tabla 3.13 se hace mención de algunas de ellas.

Tabla 3.13. Investigaciones sobre el uso de mucílago de nopal como coagulante

Autor (es)	Aplicado en	Resultados
López (2000).	Agua potable.	Usado como coagulante a dosis de 0.8mL/L obteniendo resultados comparables al sulfato de aluminio removiendo 90% de turbidez.
Zhang <i>et al.</i> (2006).	Aguas residuales, agua potable y agua de mar.	Coadyuvante de coagulación combinado con cloruro de aluminio removiendo 97% de turbidez.
Miller <i>et al.</i> (2008).	Aguas sintéticas.	Remoción del 98% de turbiedad. A través de mediciones de potencial zeta e imágenes de microcopia electrónica siguen el mecanismo de coagulación de puenteo.
González <i>et al.</i> (2009).	Aguas sintéticas.	Remociones de turbidez del 91 al 96% a una dosis de 450 ppm.
Castellanos <i>et al.</i> (2012).	Lixiviados.	Se usó mucílago acuoso removiendo 80% de turbidez.

3.5.- Propuesta de tratamiento y aporte de la investigación

Se propuso el tratamiento de lixiviados maduros de la etapa III del RSBP a través del proceso de coagulación-floculación usando mucílago de nopal, aprovechando su composición polimérica lineal, formada de polisacáridos, eliminándose de esta forma el uso de productos químicos.

Como un aporte al tratamiento de lixiviados se evaluó el método de coagulación-floculación, usando el mucílago de nopal extraído del parénquima del cactus de nopal (*Opuntia ficus-indica*). Dadas las características particulares de los lixiviados del RSBP, de baja turbidez y alto color, se decidió agregar bentonita a los lixiviados al realizar el proceso de tratamiento con mucílago de nopal, para de esta forma favorecer el proceso de floculación, aumentando el material en suspensión y la frecuencia de colisiones, favoreciendo la formación del flóculo, como lo siguieren las investigaciones de Lorenzo-Acosta *et al.* (2006) y Lainés *et al.* (2008). Además, se evaluó la factibilidad técnica e económica del proceso usando la Matriz de Decisión Multicriterio.

La propuesta fue una aportación novedosa que buscó darle una valorización al residuo orgánico de pencas de nopal de más de tres meses que no han sido cortadas aún de la planta madre.

4.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología que se desarrolló en el presente trabajo de tesis se muestra en la Figura 4.1 y se divide en cinco fases, las cuales se describen a continuación.

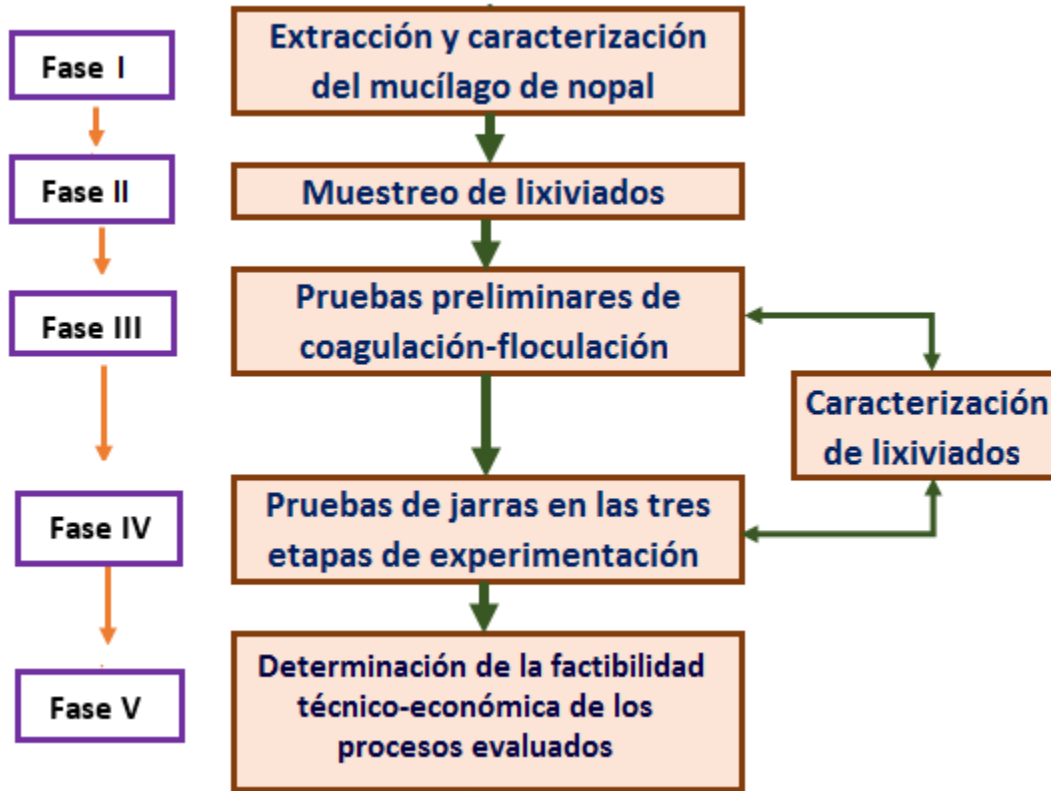


Figura 4.1. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada

Fase I.- Extracción y caracterización del mucílago de nopal: se realizó a nivel laboratorio la extracción y caracterización del mucílago de nopal.

Fase II.- Muestreo de lixiviados: durante el año 2016 se realizaron ocho muestreos de lixiviados.

Fase III.- Pruebas preliminares: se hicieron las primeras pruebas del proceso de coagulación-floculación en los lixiviados, utilizando cloruro férrico, poliamina - coagulante orgánico comercial- y mucílago de nopal, con el objetivo de determinar los valores que favorecieran cada proceso. En esta fase se incluyó la caracterización de los lixiviados, antes y después de los sistemas de tratamiento.

Fase IV.- Pruebas de jarras: se realizó formalmente el tratamiento a los lixiviados con el proceso físicoquímico de coagulación-floculación, dividiéndose en tres etapas:

- Etapa I. Coagulante inorgánico comercial (cloruro férrico).
- Etapa II. Coagulante orgánico comercial (poliamina).
- Etapa III. Coagulante orgánico natural (mucílago de nopal).

En cada alternativa se determinaron las mejores condiciones del tratamiento (pH, concentraciones de coagulante y floculante).

Fase V. Se determinó la factibilidad técnico-económica de los tratamientos propuestos usando la metodología de Matriz de Decisión Multicriterio.

Se describen a continuación con detalle cada fase.

4.1.- Fase I. Extracción y caracterización del mucílago de nopal

4.1.1.- Extracción del mucílago de nopal

Para extraer el mucílago de nopal se usaron pencas de nopal de *Opuntia ficus-indica*, proveniente de la Delegación Milpa Alta, Ciudad de México, adquiridas en el establecimiento denominado “Centro de Acopio del Nopal”. Se seleccionaron pencas de por lo menos 3 meses para realizar la extracción del mucílago, ya que estas pencas tienen un grosor mayor que las pencas que se comercializan normalmente, las cuales son de un mes de cosecha. Este mayor grosor facilitó las etapas de pelado y limpieza de los procedimientos de extracción (Figura 4.2).

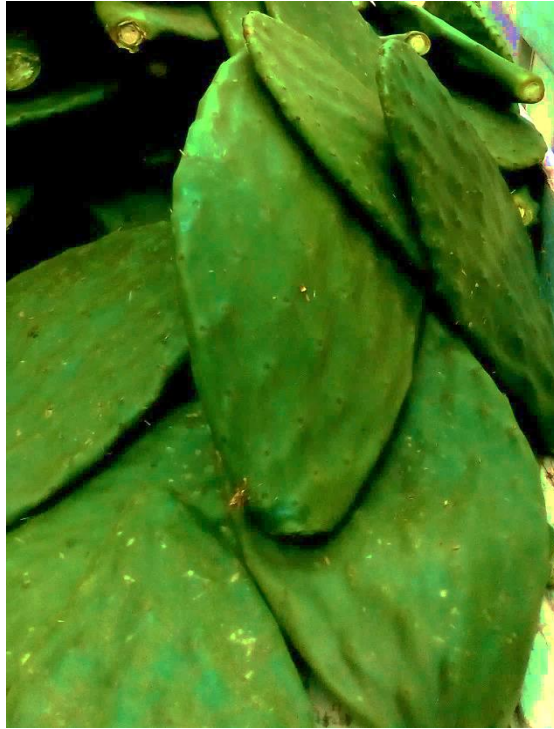


Figura 4.2. Fotografía de nopales que se usaron en la investigación

La metodología de extracción del mucílago señalada en diferentes investigaciones es muy variada, desde metodologías muy simples como las señaladas por Vargas-Rodríguez y Ramos-Ramírez (2003), hasta otras más complejas, como la utilizada por Habibi *et al.* (2004). A partir de datos obtenidos por Rodríguez *et al.* (2011), Figueroa *et al.* (2011) y Sepúlveda *et al.* (2007), se propusieron tres diferentes procesos de extracción de mucílago de nopal.

En la Figura 4.3 se muestran los procedimientos planteados para la extracción de mucílago de nopal.

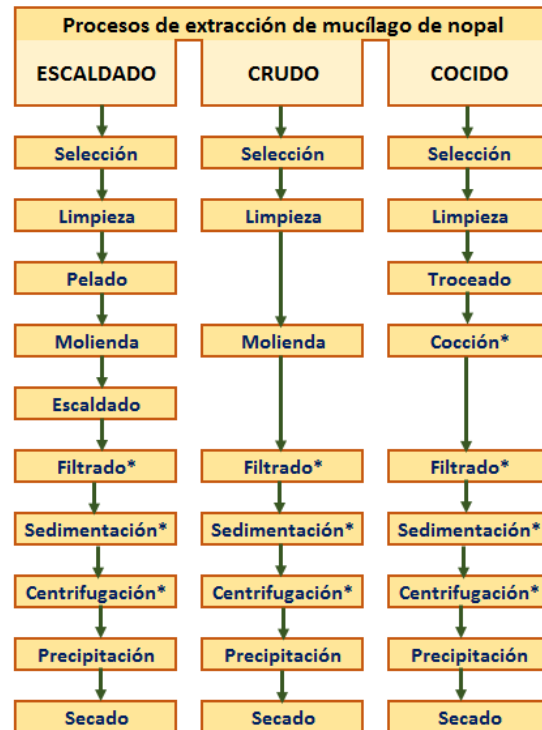


Figura 4.3. Diagrama de bloques de los procesos de extracción de mucílago de nopal utilizados en la investigación. *: Después de estas etapas se elimina el residuo sólido y se continúa con el líquido

Las condiciones de cada una de las etapas fueron las siguientes (Figura 4.4):

- El lavado se realizó con agua de la red y las pencas se cepillaron para eliminar las espinas, facilitando su manipulación. El pelado se hizo manualmente con cuchillo, tratando de eliminar la menor cantidad de pulpa con la piel.
- Se mezclaron partes iguales de nopal y agua destilada para facilitar la molienda. Se utilizó una licuadora comercial a 3000 RPM para la molienda de las pencas.
- El escaldado del producto molido se hizo a 80 °C durante 5 minutos. Para la cocción del producto troceado -piezas de aproximadamente 5 cm de lado- su usó agua destilada (proporción 1:1, nopal: agua) a ebullición durante 30 minutos.
- La centrifugación se realizó a cinco mil RPM por 20 minutos. La precipitación del mucílago de la fase acuosa se realizó con incorporación de alcohol etílico

desnaturalizado -proporción 1: 3, solución: alcohol- provocándose la insolubilización de los polímeros. El precipitado se separó por decantación - sedimentación previa de cuatro horas- y centrifugación a dos mil RPM por 20 minutos.

- El secado del precipitado, para eliminar el solvente orgánico usado, se realizó adaptando un sistema de vacío a un matraz Kitazato por cuatro horas.

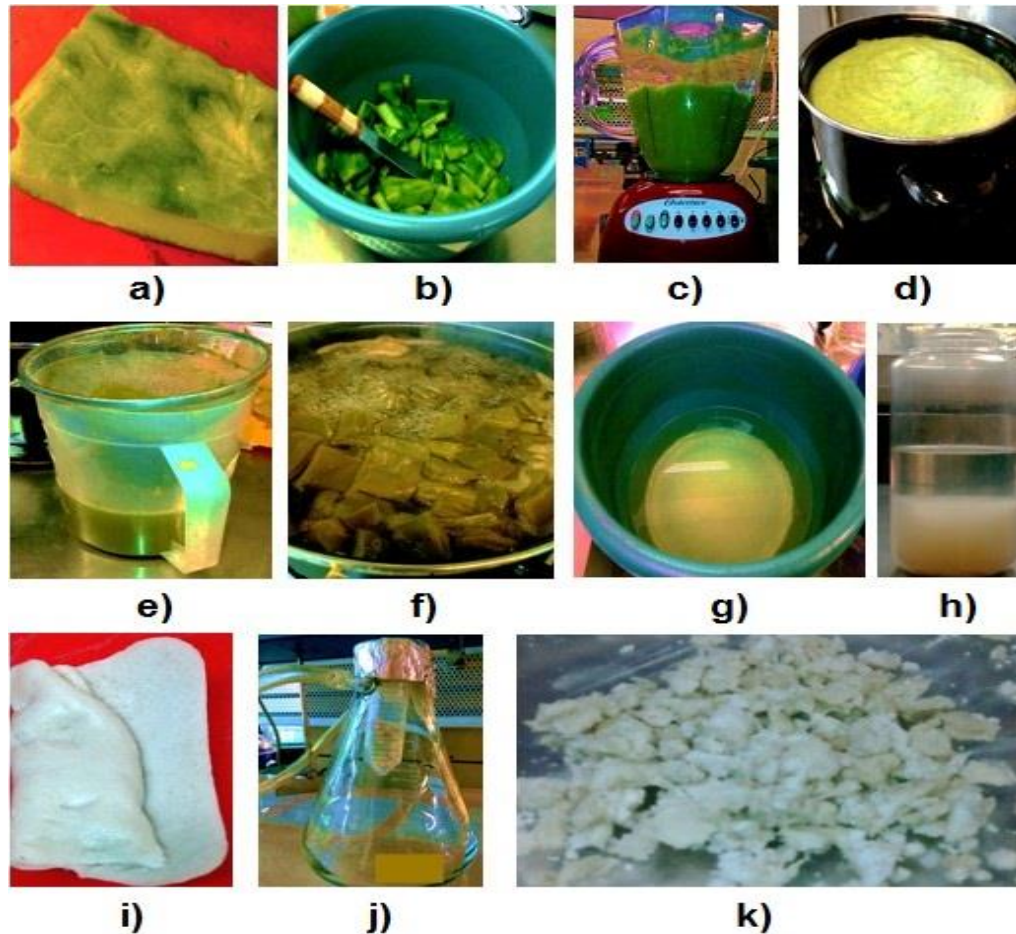


Figura 4.4. Fotografías de las etapas de los procesos de extracción del mucílago de nopal. **a)** Pelado, **b)** Troceado, **c)** Molido, **d)** Escaldado, **e)** Filtrado, **f)** Cocido, **g)** Sedimentación, **h)** Mucílago en solución para centrifugar, **i)** Mucílago sin secar, **j)** Secado y **k)** Mucílago seco

4.1.2.- Caracterización del mucílago de nopal

A cada mucílago extraído se le realizó un análisis proximal, evaluándose el contenido de humedad, proteína cruda, fibra cruda, lípidos crudos, ceniza y

carbohidratos en cada muestra. La metodología que se siguió en cada determinación se describe a continuación.

4.1.2.1.- Humedad

La determinación del contenido de humedad se basó en la medición de la pérdida de peso debido a la evaporación de agua. Este método se basó en el secado de una muestra de mucílago de nopal en una estufa y su determinación por diferencia de peso entre el material seco y húmedo (Figura 4.5). Se pesaron cinco gramos de muestra y se colocaron en una estufa a 70 °C, por un mínimo de 12 h. Se dejó enfriar la muestra en un desecador. Se pesó nuevamente la muestra (AOAC, 1990). Se usó la Ecuación 4.1. para obtener el contenido de humedad.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{(B-A)-(C-A)}{B-A} 100 \dots \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

- A. Peso de la charolilla seca y limpia (g).
- B. Peso de la charolilla + muestra húmeda (g).
- C. Peso de la charolilla + muestra seca (g).



Figura 4.5. Procedimiento para la determinación del contenido de humedad en las muestras de mucílago de nopal

4.1.2.2.- Proteína cruda

El análisis se efectuó mediante el método Kjeldahl, mismo que evalúa el contenido de nitrógeno total en la muestra, después de ser digerida con ácido sulfúrico en presencia de un catalizador de selenio. Se usó el método simple propuesto por Chow *et al.* (1980) y AOAC (1990). El procedimiento se describe a continuación (Figura 4.6):

- 1) Se pesó con precisión un gramo de muestra y se colocó en un matraz Kjeldahl, se agregaron 10 g de sulfato de potasio, 0.7 g de óxido de selenio y 20 mL de ácido sulfúrico concentrado.
- 2) Se colocó el matraz en el digestor Kjeldahl con un ángulo inclinado y caliente a ebullición hasta que la solución se veía clara, se calentó por 30 minutos más.
- 3) Se dejó enfriar. Se agregaron 90 mL de agua destilada. Ya frío se adicionaron 25 mL de solución de hidróxido de sodio y se mezcló.
- 4) Se agregó una perla de ebullición y 80 mL de solución de hidróxido de sodio al 40%, manteniendo inclinado el matraz.
- 5) Se conectó rápidamente el matraz a la unidad de destilación, se calentó y colectaron 50 mL del destilado -conteniendo el amonio- en 50 mL de solución indicadora de ácido bórico (se agregaron 5 mL de una solución con 0.2% de verde de bromocresol a un litro de solución saturada de ácido bórico).
- 6) Al terminar de destilar se removió el matraz receptor, se enjuagó la punta del condensador y se tituló con una solución estándar de ácido clorhídrico 0.1N.

Se usaron las ecuaciones 4.2 y 4.3 para obtener el porcentaje de proteína cruda en la muestra.

$$\text{Nitrógeno de la muestra (\%)} = \frac{A * B}{C} 0.014 * 100 \dots \text{Ecuación 4.2}$$

$$\text{Proteína cruda (\%)} = \text{Nitrógeno de la muestra (\%)} * 6.25 \dots \text{Ecuación 4.3}$$

Donde:

- A. Ácido clorhídrico usado en la titulación (mL).
- B. Normalidad del ácido estándar.
- C. Peso de la muestra (g).

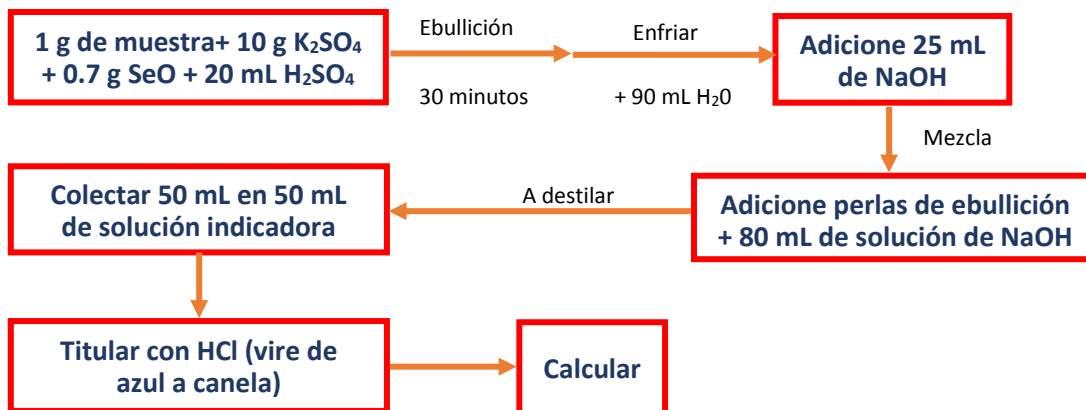


Figura 4.6. Procedimiento para la determinación de la proteína cruda en las muestras de mucílago de nopal

4.1.2.3.- Lípidos crudos

En este método los lípidos o grasas de la muestra fueron extraídas con éter etílico y evaluadas como porcentaje del peso después de evaporar el solvente (Figura 4.7).

El procedimiento seguido se describe a continuación (AOAC, 1990):

- 1) Se secó la muestra a 105 °C, sin tocarla con los dedos, se enfrió en un desecador y se pesó.
- 2) Se pesó en un dedal de extracción manejado con pinzas tres gramos de la muestra seca y se colocó en la unidad de extracción. Se conectó al extractor el matraz con éter etílico a dos tercios del volumen total.
- 3) Se llevó a ebullición y se ajustó el calentamiento de tal manera que se obtuvieron 10 reflujos por hora.
- 4) Se evaporó el éter por destilación. Se colocó el matraz en una estufa durante cuatro horas para eliminar el éter. Se enfriaron los matraces en el desecador y se pesaron. La muestra desengrasada se usó para la determinación de fibra cruda.

Se usó la Ecuación 4.4 para calcular el porcentaje de lípidos crudos en la muestra.

$$\text{Contenido de lípidos crudos (\%)} = \frac{B-A}{C} 100 \dots \text{Ecuación 4.4}$$

Donde:

- A. Peso del matraz seco y limpio (g).
- B. Peso del matraz con grasa (g).
- C. Peso de la muestra (g).

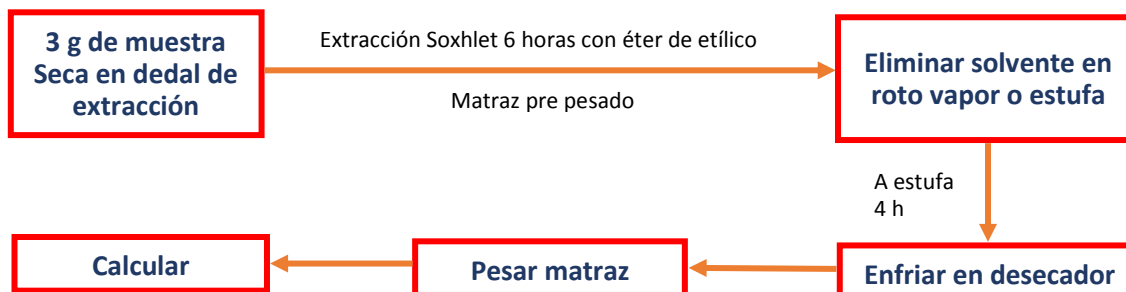


Figura 4.7. Procedimiento para la determinación de los lípidos crudos en las muestras de mucílago de nopal por el método de Soxhlet

4.1.2.4.- Fibra cruda

Se determinó el contenido de fibra de la muestra después de ser digerida con soluciones de ácido sulfúrico 0.255 N e hidróxido de sodio 0.313 N, calcinando el residuo (Figura 4.8). La diferencia de pesos después de la calcinación indicó la cantidad de fibra presente. El procedimiento se describe a continuación (AOAC, 1990):

- 1) Se pesaron dos gramos de la muestra, desengrasada y seca. Se colocó en un matraz y se adicionaron 200 mL de solución de ácido sulfúrico a ebullición.
- 2) Se colocó el condensador y se llevó a ebullición por un minuto. Se hirvió por 30 minutos manteniendo constante el volumen con agua destilada, moviendo periódicamente el matraz removiendo las partículas adheridas a las paredes.
- 3) Se instaló el embudo Büchner con un papel filtro, se precalentó con agua hirviendo. Simultáneamente y al término del tiempo de ebullición, se retiró el matraz dejando reposar por un minuto y se filtró usando succión por 10 minutos. Se lavó el papel filtro con agua caliente.
- 4) Se transfirió el residuo al matraz con ayuda de una pizeta que contenía 200 mL de solución de NaOH en ebullición. Se dejó hervir por 30 minutos como en el paso 2. Se precalentó el crisol de filtración con agua hirviendo y se filtró cuidadosamente después haber reposado por 1 minuto. Se colocó el crisol

en una estufa a 105 °C por 12 horas y se enfrió en desecador. Se pesaron rápidamente los crisoles con el residuo, sin manipularlos. Se dejó enfriar en desecador y pesó.

Se empleó la Ecuación 4.5 para obtener el contenido de fibra cruda en la muestra.

$$\text{Contenido de fibra cruda (\%)} = \frac{A-B}{C} 100 \dots \text{Ecuación 4.5}$$

Donde: A. Peso del crisol con el residuo seco (g).

B. Peso del crisol con la ceniza (g)

C. Peso de la muestra (g).

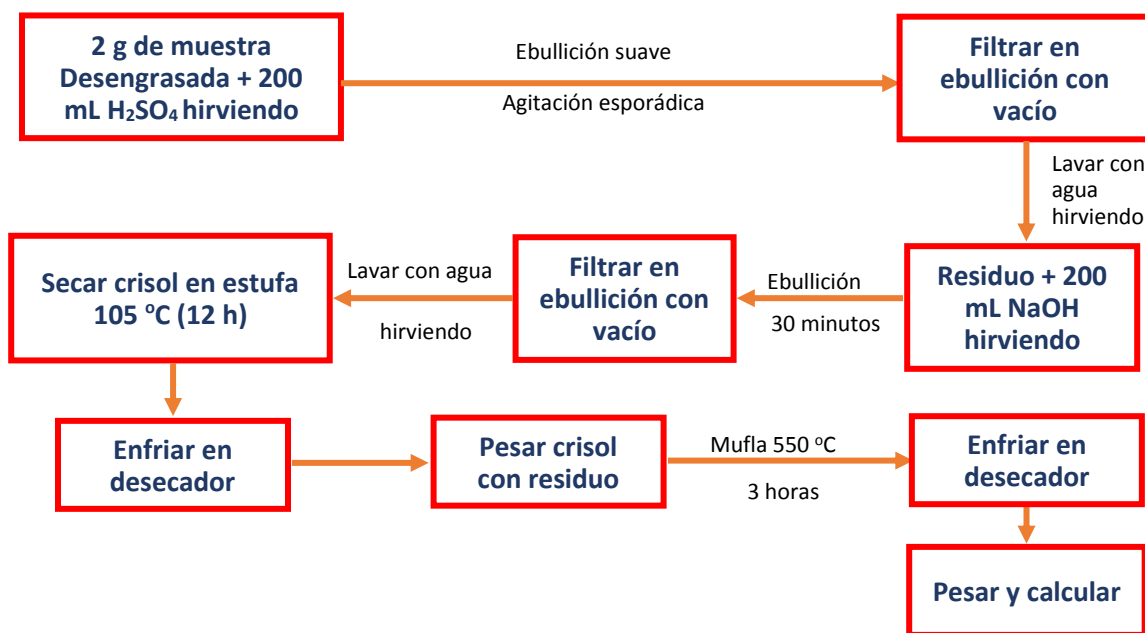


Figura 4.8. Procedimiento para la determinación de fibra cruda en las muestras de mucílago de nopal

4.1.2.5.- Ceniza

Se usó el método de calcinación, obteniendo el contenido de minerales totales o de material inorgánico de la muestra (Figura 4.9). El procedimiento seguido se describe a continuación (FAO, 2012):

- 1) En un crisol de porcelana, previamente calcinado y llevado a peso constante, se colocaron 2.5 g de muestra seca.
- 2) Se colocó el crisol en una mufla y se calcinó a 550 °C por 12 horas. Se dejó enfriar y se pesó en desecador.

Se usó la Ecuación 4.6 para calcular el porcentaje de ceniza en la muestra.

$$\text{Contenido de ceniza (\%)} = \frac{A-B}{C} 100 \dots \text{Ecuación 4.6}$$

Donde:

- A. Peso del crisol con muestra (g).
- B. Peso del crisol con ceniza (g).
- C. Peso de la muestra (g).

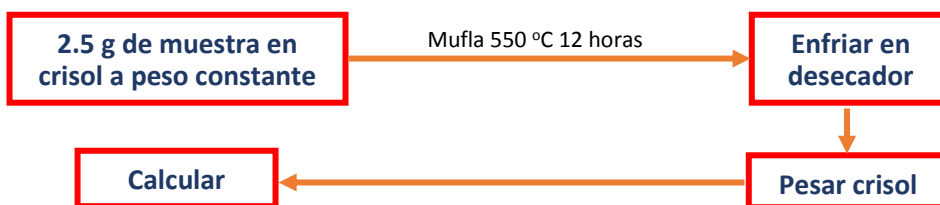


Figura 4.9. Procedimiento para la determinación de cenizas en las muestras de mucílago de nopal

4.1.2.6.- Carbohidratos

Dentro de este concepto se agruparon todos los elementos no evaluados en los métodos anteriores, constituidos principalmente por carbohidratos y demás compuestos orgánicos solubles no nitrogenados -caso de la estructura del mucílago del *Opuntia ficus-indica*- (FAO, 2012). Se empleó la Ecuación 4.7 para determinar el contenido de carbohidratos en la muestra.

$$\text{Carbohidratos (\%)} = 100 - (A + B + C + D + E) \dots \text{Ecuación 4.7}$$

Donde:

- A. Contenido de humedad (%).
- B. Contenido de proteína cruda (%).

- C. Contenido de lípidos crudos (%).
- D. Contenido de fibra cruda (%).
- E. Contenido de ceniza (%).

4.2.- Fase II. Muestreo de lixiviados del RSBP

Los lixiviados que se usaron en esta investigación se obtuvieron del relleno sanitario Bordo Poniente (RSBP), etapa III. El RSBP se encuentra en la Zona Federal de lo que fuera el Lago de Texcoco, colinda al poniente con el Periférico Oriente, al oriente con el Dren General del Valle de México, al norte con el Río de los Remedios y al sur con el brazo derecho del Río Churubusco (Figura 4.10).



Figura 4.10. Ubicación del relleno sanitario Bordo Poniente.
Fuente: Google earth, 2016

Sus coordenadas geográficas son:

- Longitud: 99° 00' 14.51" y 99° 02' 36.21" Oeste
- Latitud: 19° 26' 09.36" y 19° 29' 09.22" Norte

En la Tabla 4.1 se muestran los datos más representativos de cada una de las cuatro etapas del RSBP.

Tabla 4.1. Datos representativos de las cuatro etapas del RSBP

Etapa	Superficie (ha)		Residuos recibidos en su vida útil (tonX10 ⁶)	Periodo de operación
	Total	En operación		
I	75	63.58	3.8	Febrero-1985 a julio-1988. Febrero-1991 a junio-1992.
II	80	64.1	3.4	Julio-1988 a julio-1991. Febrero-1993 a junio-1984.
III	104	102.66	6.9	Agosto-1991 a noviembre-1994.
IV	412	351.33	68.78	Noviembre-1994 a diciembre-2011.

Fuente: Alcantar, 2015

En la etapa III existen 12 cárcamos de lixiviados. Las nomenclaturas de estos cárcamos se registran en la Tabla 4.2 y en la Figura 4.11 se ubica geográficamente el cárcamo donde se muestreó -cárcamo C8-.

Tabla 4.2. Cárcamos de lixiviados, etapa III del RSBP

Cárcamos de lixiviados, etapa III, y su simbología	
Cárcamo	Simbología
2	C-2
3	C-3
6	C-6
7	C-17
8	C-18
10	C-10
13	C-13
14	C-14
15	C-15
16	C-16
18	C-18
Oeste	C-Oeste

Fuente: Alcantar, 2015

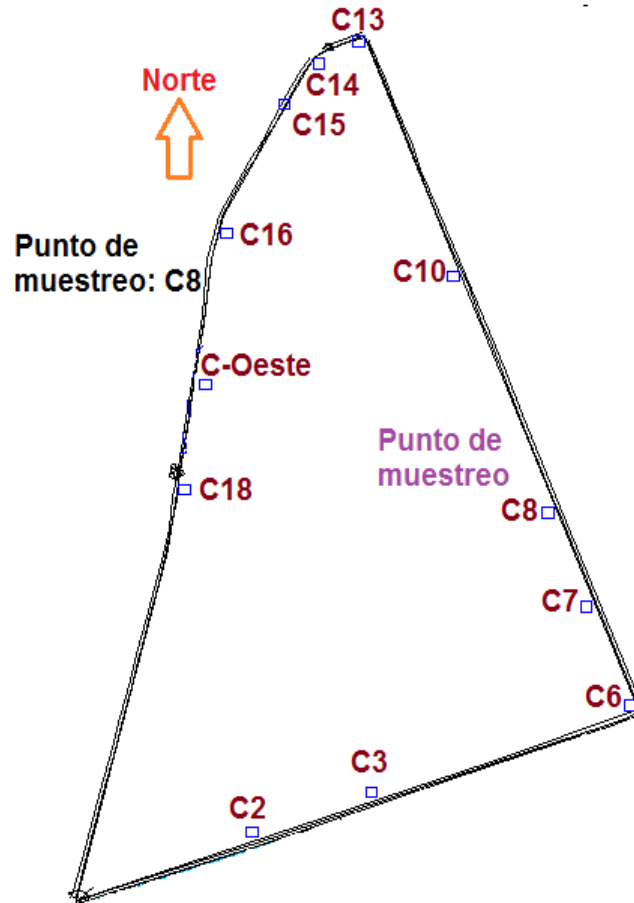


Figura 4.11. Punto de muestreo en la etapa III del RSBP, cárcamo 8 (C8). Fuente: Adaptado de Alcantar, 2015

Para el muestreo se aplicó la Norma Oficial Mexicana vigente para aguas residuales, NMX-AA-003-1980 (DGN, 1980), adaptada al comportamiento de lixiviados. Se usó un muestreador Winkler que se sumergía en el cárcamo para extraer la muestra (Figura 4.12).



Figura 4.12. Procedimiento de muestreo de lixiviados en la etapa III del RSBP. **a)** Ingreso del muestreador Winkler. **b)** Muestreador con lixiviado

Se siguió el siguiente procedimiento:

- Se usaron recipientes de polietileno para transportar las muestras. Las tapas proporcionaron un cierre hermético a los recipientes.
- Se tomaron las precauciones necesarias para que en cualquier momento fuera posible identificar las muestras. Se emplearon etiquetas numerando los recipientes, anotando la información en una hoja de registro.
- Las muestras fueron representativas de las condiciones que existían en el punto y hora de muestreo. Se usaron recipientes de polietileno de 10 y de 20 L de capacidad para almacenar los lixiviados.
- Se conservaron las muestras en refrigeración a una temperatura de 4°C hasta su análisis y tratamiento. El intervalo de tiempo entre la extracción de la muestra y su análisis fue el menor tiempo posible y no excedió de tres días.
- Se tomaron las debidas precauciones de seguridad y de higiene en el muestreo, considerando la alta toxicidad de los lixiviados (se usaron bata y guantes).

4.3.- Fase III. Caracterización de lixiviados

Como ya se mencionó no existe normativa mexicana referente a la caracterización de lixiviados, por lo que se tomaron como referencia las Normas Oficiales Mexicanas aplicables en aguas residuales, como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Referencias normativas para la caracterización de lixiviados

Parámetro	Norma o método de referencia	Principio de aplicación
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011	Método electrométrico basado en la medición de la fuerza electromotriz de una celda electroquímica, que consta de la muestra, un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia (DOF, 2011; APHA, 2005).
DQO	NMX-AA-030-SCFI-2012	Reflujo cerrado en presencia de sulfato de mercurio (II) de una porción de prueba con una cantidad conocida de dicromato de potasio y catalizador de plata en ácido sulfúrico concentrado en un período fijo, calculando del valor de la DQO a partir de la cantidad de dicromato reducido (DOF, 2013).
DBO ₅	NMX-AA-028-SCFI-2001	Medición de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente, determinándose por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C (DOF, 2001b).
Color	NMX-AA-017-1980	Medir la transmisión de la luz producida a través de una muestra, la cual se comparará con un testigo (iluminante patrón), generalmente agua bidestilada cuya transmitancia es de 100% (DOF, 1980).
Turbiedad	NMX-AA-038-2001	La comparación entre la intensidad de la luz dispersada por la muestra bajo condiciones definidas y la intensidad de luz dispersada por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones; a mayor dispersión de luz corresponde una mayor turbiedad (DOF, 2001a).

Los parámetros que se evaluaron fueron: pH, DQO, DBO₅, color y turbiedad. La caracterización se realizó a los lixiviados crudos y a los lixiviados después del tratamiento de coagulación-floculación. Los equipos que se usaron en las determinaciones se mencionan en la Tabla 4.4.

El procedimiento en las determinaciones fue el siguiente:

Tabla 4.4. Equipos usados en esta investigación para la caracterización de lixiviados

Parámetro	Equipos	Características
pH	Potenciómetro	Marca Oakton, modelo pH11.
DQO	Termoreactor	Marca Hach, modelo DRB200.
	Viales	15*16 mm, rango alto de 20 a 1500 mg/L.
	Espectrofotómetro	Marca Hach, modelo DR1900.
DBO ₅	Respirómetro	Marca Hach, modelo: BOD Track II, rango de medición de 0 a 700 mg/L.
Color	Espectrofotómetro	Marca Hach, modelo DR1900, RANGO DE 0 A 500 U Pt-Co.
Turbiedad	Turbidímetro	Marca Hach, modelo 2100Qis, rango de 0 a 800 UTN.

- **pH:** se calibró el equipo usando soluciones de calibración con valores de pH de 1.68, 4.01, 7.00 y 10.00. Se enjuagó la sonda con agua desionizada y se secó con un trapo que no tuviera pelusa. Se colocó la sonda en la muestra agitando suavemente, de forma que las uniones de referencia estuvieran completamente sumergidas.
- **DQO:** se siguió la metodología establecido en el método 8000 Hach (HACH, 2000) usando 2 mL de muestra, con digestión por 2 horas a 150 °C (debido al alto valor de DQO se realizaron diluciones 1:10). El espectrofotómetro se usó a 620 nm. Para la preparación del blanco se usó agua desionizada.
- **DBO₅:** se siguió el procedimiento establecido en el manual del equipo (HACH, 2013a). Su usó el rango de medición de 0 a 700 mg/L
- **Color:** se siguió el método 8025 Hach (HACH, 2000), usando 10 mL de muestra en cada determinación (debido a las características de alto color de los lixiviados se realizó dilución de 1:10). El espectrofotómetro se usó a una longitud de onda de 455 nm. Como blanco se usó agua desionizada.
- **Turbiedad:** se siguieron las indicaciones del manual del equipo (HACH, 2013b). Como estandar de turbidez se usaron soluciones a 10, 20, 100 y 800 UTN.

4.4.- Fase IV y fase V. Pruebas de jarras

4.4.1.- Proceso general de coagulación-floculación

Para definir las condiciones del proceso se utilizó un equipo de prueba de jarras a temperatura ambiente, valorándose diferentes concentraciones de coagulante y floculante, y diferentes valores de pH. Se realizaron ensayos siguiendo el diseño factorial con tres repeticiones de cada tratamiento para evaluar la reproducibilidad de los experimentos. Se desarrollaron tres etapas de experimentación:

- Etapa I. Se usó cloruro férrico como coagulante a concentraciones de 1.4, 2.2 y 3.0 g/L; y poliacrilamida como floculante a concentraciones de 0.10, 0.15 y 0.20 g/L.
- Etapa II. Se usó poliamina como coagulante a concentraciones de 0.50, 0.75 y 1.00 g/L; y poliacrilamida como floculante a concentraciones de 0.015, 0.025 y 0.035 g/L.
- Etapa III. Se usó mucílago de *Opuntia-ficus* a concentraciones de 0.50, 0.75 y 1.00 g/L; y bentonita sódica a concentraciones de 1.0, 2.0 Y 3.0 g/L.

Las concentraciones para evaluar el coagulante, floculante y pH se fijaron a partir de pruebas preliminares sobre los lixiviados colectados, seleccionándose las concentraciones en las que se observaron mejores condiciones de coagulación-floculación considerando el índice de Willcomb observado, seleccionando aquellas condiciones con índices de Willcomb de 10 y 8. Se usó también el comparador desarrollado por el Instituto de Investigación del Agua Water de Inglaterra para valorar el tamaño de los flóculos formados, dándose preferencia a los procesos con flóculos "F" y "G". Las condiciones específicas del proceso de coagulación en cada etapa de experimentación se detallan en las secciones 4.4.3, 4.4.4 y 4.4.5 de este trabajo de tesis.

Los ensayos de coagulación-floculación se realizaron en un equipo de prueba de jarras Jastester, marca Phipps (Figura 4.13), adaptándose seis vasos de precipitados de 1,000 mL con paletas de agitación -18.5 mm x 43.5 mm-. Se usó un

volumen de 500 mL de lixiviados en cada vaso de precipitado para la realización de los experimentos.

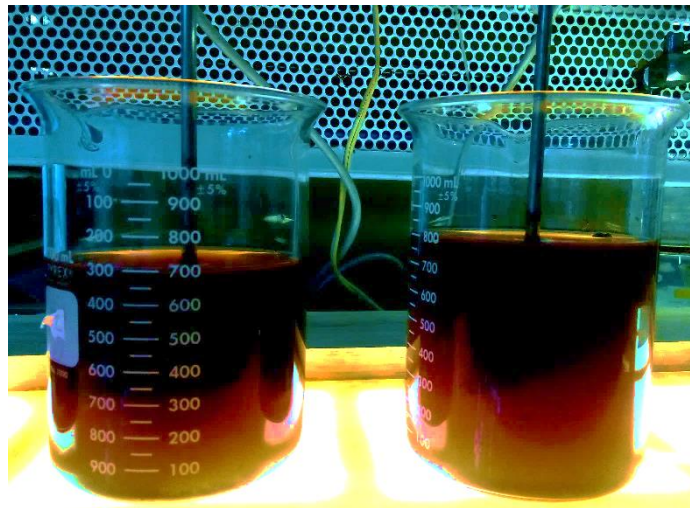


Figura 4.13. Fotografía representativa de las pruebas de jarras desarrolladas en la investigación

Antes de iniciar las pruebas las muestras fueron llevadas a temperatura ambiente, de forma que durante el tiempo en el que se alcanzó esta temperatura se realizó simultáneamente una sedimentación, removiéndose cualquier sólido grueso presente.

Para acondicionar el pH de los lixiviados se usó ácido sulfúrico concentrado, los valores a los que se acondicionó el pH están indicados en cada etapa de experimentación (secciones 4.4.3, 4.4.4 y 4.4.5 de este trabajo de tesis). Después del proceso de sedimentación se tomaron muestras del sobrenadante (200 mL) dos cm por debajo del nivel del sobrenadante y se filtraron en papel Whatman cuantitativo número 40 (8 μm) para eliminar sólidos.

Se determinaron las lecturas finales de los lixiviados (después de los tratamientos) de DBO_5 , DQO, turbidez y color. La eficiencia de remoción se obtuvo usando la Ecuación 4.8, en donde C_i y C_f representan los parámetros iniciales (antes del tratamiento) y finales (después del tratamiento), respectivamente.

$$\% \text{Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \dots \text{Ecuación 4.8}$$

4.4.2.- Análisis estadístico

Con el fin de optimizar el número de experimentos y el tiempo de realización se usó el modelo de superficie de respuesta. Este método se basa en el principio de que el efecto sobre el resultado experimental provocado por la combinación de varias variables puede ser previsto por los resultados obtenidos con experimentos realizados. De esta forma los resultados experimentales generarán modelos matemáticos con los que se podrá prever los resultados de los experimentos; además, se podrán definir los valores de las variables en un valor máximo de la respuesta que se este evaluando. La respuesta que se evaluó fue la remoción de DQO.

El modelo de superficie de respuesta ha sido utilizada para obtener aproximaciones por modelos cuadráticos de las variables monitoreadas. Este método consiste en tomar en cuenta la contribución de las variables independientes de un modelo en particular, para poder generar una aproximación por un modelado basado en el concepto de mínimos cuadrados no lineales (Zamudio, 2014).

Se usó el programa estadístico Minitab 17 (Minitab de aquí en adelante) para evaluar el modelo de superficie de respuesta, tomando como parámetros a evaluar: concentración de coagulante, concentración del floculante y pH; la variable de respuesta fue el porcentaje de remoción de DQO. Se usó el modelo cuadrático completo para generar el análisis estadístico de cada etapa de experimentación.

4.4.3.- Experimentación etapa I. Uso de coagulante inorgánico

En esta etapa de la experimentación se evaluó el efecto de un coagulante inorgánico en el tratamiento de lixiviados (cloruro férrico). Partiendo de las investigaciones desarrollados por Tatsi *et al.* (2003), Rivas *et al.* (2004) y Ntampou *et al.* (2006), que afirman que la materia orgánica recalcitrante presente en los lixiviados es removida con mayor facilidad por sales de hierro que por sales de aluminio, se decidió usar como coagulante inorgánico cloruro férrico grado analítico (marca Meyer). Para la

realización de las pruebas de jarras se usaron los productos específicos indicados en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Productos usados en experimentación etapa I

Productos usados		
Nombre	Características	Concentraciones (g/L)
Cloruro férrico	Sal inorgánica usada como coagulante, grado analítico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), marca Meyer.	1.4, 2.2 y 3.0
FLOERGER FO 4800SSH Poliacrilamida	Floculante orgánico comercial, polímero catiónico soluble en agua, alto peso molecular, marca SNF.	0.10, 0.15 y 0.20

Las concentraciones para evaluar el cloruro férrico y del floculante se fijaron partiendo de las investigaciones realizadas por Nájera *et al.* (2009), Nájera *et al.* (2011), Lozano-Rivas (2012), Lainés *et al.* (2008) y de pruebas preliminares en los lixiviados tratados. Se establecieron las condiciones señaladas en la Tabla 4.6 con un diseño factorial completo con dos niveles para el pH y tres niveles para las dosis de coagulante y floculante.

Para la dosificación del coagulante y floculante se prepararon las correspondientes soluciones madre, con las concentraciones mencionadas en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Soluciones madre usadas en la experimentación etapa I

Solución usada	Parámetro	
	Concentración (g/L)	pH
Coagulante	220.00	1.24
Floculante	2.50	3.29

Para la realización de las pruebas de jarras se usaron las condiciones mencionadas en la Tabla 4.8, partiendo de las condiciones usadas por Nájera *et al.* (2009) y Nájera *et al.* (2011).

Tabla 4.6. Condiciones de experimentación etapa I

Experimento	pH	Coagulante (g/L)	Floculante (g/L)
1	7.0	1.40	0.10
2	7.0	2.20	0.10
3	7.0	3.00	0.10
4	7.0	1.40	0.15
5	7.0	2.20	0.15
6	7.0	3.00	0.15
7	7.0	1.40	0.20
8	7.0	2.20	0.20
9	7.0	3.00	0.20
10	6.0	1.40	0.10
11	6.0	2.20	0.10
12	6.0	3.00	0.10
13	6.0	1.40	0.15
14	6.0	2.20	0.15
15	6.0	3.00	0.15
16	6.0	1.40	0.20
17	6.0	2.20	0.20
18	6.0	3.00	0.20

Tabla 4.8. Condiciones del proceso de coagulación-floculación en la experimentación etapa I

Proceso de coagulación-floculación			
Etapa		Condiciones	
		RPM	Tiempo (min)
1	Homogenización	250	5
2	Agregar coagulante	250	Simultáneamente
3	Coagulación	250	1
4	Agregar floculante	250	Simultáneamente
5	Floculación	250	0.6666
		30	20
6	Sedimentación	0	30

RPM: Revoluciones por minuto de las aspas

4.4.4.- Experimentación etapa II. Uso de coagulante orgánico comercial

Se evaluó el efecto de un coagulante orgánico comercial en el tratamiento de lixiviados. Para la realización de las pruebas de jarras se usaron los productos indicados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Productos usados en la experimentación etapa II

Productos usados		
Nombre	Características	Concentraciones (g/L)
FLOQUAT FL3249 Poliamina	Coagulante comercial orgánico catiónico, peso molecular alto, marca SNF.	0.50, 0.75 y 1.0
FLOERGER F04800SSH Poliacrilamida	Floculante orgánico comercial, polímero catiónico soluble en agua, alto peso molecular, marca SNF.	0.015, 0.025 y 0.035

Las concentraciones para evaluar el coagulante orgánico comercial y del floculante se fijaron a partir de pruebas preliminares en los lixiviados. Se establecieron las condiciones de experimentación que se muestran en la Tabla 4.10, con un diseño factorial completo con dos niveles de pH y tres niveles para las dosis de coagulante y floculante.

Para dosificar el coagulante y floculante se prepararon las correspondientes soluciones madre, como se señala en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Condiciones de soluciones madre usadas en la experimentación etapa II

Solución usada	Parámetro	
	Concentración (g/L)	pH
Coagulante	75.00	5.90
Floculante	2.50	3.29

Al realizar las pruebas de jarras en esta etapa de la experimentación se usaron las condiciones recomendadas por el proveedor del coagulante y del floculante (SNF, 2014), adaptándolas a los lixiviados en estudio, señaladas en la Tabla 4.12.

Tabla 4.10. Condiciones de experimentación etapa II

Experimento	pH	Coagulante (g/L)	Floculante (g/L)
1	8.0	0.50	0.015
2	8.0	0.75	0.015
3	8.0	1.00	0.015
4	8.0	0.50	0.025
5	8.0	0.75	0.025
6	8.0	1.00	0.025
7	8.0	0.50	0.035
8	8.0	0.75	0.035
9	8.0	1.00	0.035
10	7.0	0.50	0.015
11	7.0	0.75	0.015
12	7.0	1.00	0.015
13	7.0	0.50	0.025
14	7.0	0.75	0.025
15	7.0	1.00	0.025
16	7.0	0.50	0.035
17	7.0	0.75	0.035
18	7.0	1.00	0.035

Tabla 4.12. Condiciones del proceso de coagulación-floculación en la experimentación etapa II

Proceso de coagulación-floculación			
Etapa		Condiciones	
		RPM	Tiempo (min)
1	Homogenización	250	5
2	Agregar coagulante	250	Simultáneamente
3	Coagulación	250	2
		40	15
4	Agregar floculante	250	Simultáneamente
5	Floculación	250	0.1666
		40	5
6	Sedimentación	0	30

RPM: Revoluciones por minuto de las aspas

4.4.5.- Experimentación etapa III. Uso de mucílago de nopal

Se evaluó el efecto de un coagulante orgánico natural: mucílago de *Opuntia ficus-indica* (nopal) en el tratamiento de lixiviados. Para la realización de las pruebas de jarras se usaron los productos indicados en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Productos usados en la experimentación etapa III

Productos usados		
Nombre	Características	Concentraciones (g/L)
Mucílago de nopal	Coagulante orgánico natural	0.5, 0.75 y 1.0
Bentonita	Bentonita sódica, marca Meyer.	1,2 y 3

Para la preparación de la solución madre de coagulante se usó mucílago de nopal en polvo que se extrajo en la etapa de la caracterización del mucílago. En el caso de la bentonita, esta se agregó en polvo directamente sobre cada una de las jarras. Se usó una solución madre de mucílago de nopal a 10 g/L para su dosificación.

Las concentraciones para evaluar el mucílago de nopal y la bentonita se fijaron a partir de pruebas preliminares. Se establecieron las condiciones de experimentación señaladas en la Tabla 4.14, con un diseño factorial completo con dos niveles de pH y tres niveles para las dosis de coagulante y bentonita.

Al realizar las pruebas de jarras en esta etapa de experimentación se usaron las condiciones indicadas en la Tabla 4.15. Estas condiciones se encontraron a través de pruebas preliminares de coagulación.

Tabla 4.14. Condiciones de experimentación etapa III

Experimento	pH	Coagulante (g/L)	Bentonita (g/L)
1	7.0	0.50	2.0
2	7.0	0.75	2.0
3	7.0	1.00	2.0
4	7.0	0.50	1.0
5	7.0	0.75	1.0
6	7.0	1.00	1.0
7	7.0	0.50	3.0
8	7.0	0.75	3.0
9	7.0	1.00	3.0
10	6.0	0.50	2.0
11	6.0	0.75	2.0
12	6.0	1.00	2.0
13	6.0	0.50	1.0
14	6.0	0.75	1.0
15	6.0	1.00	1.0
16	6.0	0.50	3.0
17	6.0	0.75	3.0
18	6.0	1.00	3.0

Tabla 4.15. Condiciones del proceso de coagulación-floculación en la experimentación etapa III

Proceso de coagulación-floculación			
Etapa		Condiciones	
		RPM	Tiempo (min)
1	Homogenización	250	5
2	Agregar bentonita	250	Simultáneamente
3	Disolución de bentonita	250	1
4	Agregar coagulante	250	Simultáneamente
5	Coagulación/Floculación	250	1
		20	20
6	Sedimentación	0	30

RPM: Revoluciones por minuto de las aspas

4.5.- Fase V. Establecer la factibilidad técnica-económica de los procesos evaluados

Para la evaluación técnica y económica de los tratamientos desarrollados se usó la metodología de Matriz de Decisión Multicriterio (MDMC). Se evaluaron dos aspectos: técnico y económico, asignando un peso ponderado de 50% a cada uno. La MDMC ayuda en la toma de decisiones en un proyecto, y en este caso en la selección de los reactivos que mejor se desempeñaron, desde el punto de vista técnico y económico.

Cuando se han identificado todos los criterios a considerar en una MDM, se asigna a cada uno un peso ponderado, que defina el nivel de importancia de cada criterio expresado como porcentaje. La suma total de los pesos ponderados de todos los criterios deberá ser igual al 100%. La evaluación del desempeño de los reactivos mediante la MDMC se realizó utilizando la siguiente nomenclatura:

i: Aspecto evaluado. Por ejemplo, turbiedad final, color final, cantidad de lodos, costo de tratamiento, etc.

A_i: Calificación asignada para el aspecto i, la cual fue de 0 a 5.

n_i: Número total de aspectos evaluados en cada criterio.

A_{max}: Calificación máxima posible, en este caso es igual a 5.

B: Producto aritmético de n_i y A_{max}.

C_pi: Calificación ponderada para el aspecto i.

D: Calificación final para la combinación de reactivos evaluada.

Tomando en cuenta lo anterior, para cada pareja de coagulante y floculante (o bentonita) se calificó su desempeño en cada uno de los aspectos técnicos y económicos evaluados, asignando en cada uno de ellos una calificación A_i. La calificación de 5 se otorgó cuando el tratamiento propuesto lograba conseguir satisfactoriamente el valor deseado de algún aspecto, y esta calificación se iba reduciendo mientras más se alejaban de ese objetivo, hasta alcanzar el valor de cero.

Por otro lado, se obtuvo el valor de B y cada calificación A_i se dividió entre el primero. Estos cocientes A_i/B se multiplicaron a su vez por 50 (que es el peso ponderado correspondiente al criterio técnico o económico según fuera el caso), obteniendo de esta manera las calificaciones ponderadas $-Cp_i-$. Finalmente se sumaron todas las calificaciones ponderadas y se obtuvo, para cada combinación de reactivos, las evaluaciones finales. A continuación, se presentan las ecuaciones que se usaron para el cálculo de la calificación final:

$$B = \sum_{i=1}^n n_i \cdot A_{\max} = \sum_{i=1}^n n_i \cdot 5 \dots \text{Ecuación 4.9}$$

$$Cp_i = \frac{A_i}{B} 50 \dots (9) \dots \text{Ecuación 4.10}$$

$$D = \sum_{i=1}^n cp_i \dots (10) \dots \text{Ecuación 4.11}$$

4.5.1.- Evaluación técnica

Los criterios técnicos usados fueron: los porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos que se midieron en las pruebas de jarras-DQO, turbiedad y color-; el valor final del pH; la cantidad de lodos generados, tiempo de sedimentación de flóculos, manejabilidad de lodos generados y requerimiento de productos químicos. Se describe a continuación los criterios de asignación de peso a cada criterio.

Porcentaje de remoción de DQO, turbiedad y color. La asignación de peso se definió como sigue:

- 5= Óptimo (> 70%).
- 4= Muy bueno (entre el 50 y 70%).
- 3=Bueno (entre el 40 y 50%).
- 2=Regular (entre el 30 y 40%).
- 1=Malo (< 30%).
- 0=Muy malo (No hubo disminución).

Valor final de pH. De acuerdo con la NOM-052-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993) para que un líquido sea considerado como residuo peligroso debe tener un valor de pH entre 2 A 12.5. La asignación de peso se definió como sigue:

- 5 = Excelente (pH entre 6 y 8).
- 3= Bueno (pH entre 2 y 6, y entre 8 y 12.5).
- 0 = Malo= Cualquier otro valor.

Tiempos de sedimentación de flóculos. Estos tiempos se tomaron justo al haber terminado la etapa de floculación y sirvieron para analizar la rapidez de la sedimentación de los flóculos. Se asignó el siguiente intervalo de calificaciones:

- 5 = Muy rápido (0-3 min).
- 3 = Rápido (3-5 min).
- 1 = Regular (5-10 min).
- 0 = Lento (> 10 min).

Cantidad de lodos generados. Representa la potencialidad de la tecnología para reducir la cantidad de desechos. La tecnología más favorable es aquella que genere menor cantidad de lodos por m³ de lixiviados tratados (LT). La asignación de peso se definió como sigue:

- 5= Excelente (valores menores a 20 kg/m³ LT).
- 3= Bueno (valores entre 20 a 30 kg/ m³ LT).
- 1= Malo (valores mayores a 30 kg/m³ LT).

Manejabilidad de lodos generados. Representa la capacidad de la tecnología para recibir y procesar los lodos generados. La opción más favorable será aquella que en la que los lodos puedan procesarse de forma más sencilla. La asignación de peso se definió como sigue.

- 5= Excelente (lodos de origen orgánico natural).
- 3= Regular (lodos provenientes de un polímero sintético).
- 1= Malo (lodos generados por un coagulante inorgánico).

Requerimiento de insumos y/o aditivos químicos. Este aspecto está relacionado a la necesidad que tiene una determinada tecnología de la utilización de ciertos insumos o aditivos químicos para poder funcionar adecuadamente. La tecnología

más favorable es aquella tenga un requerimiento mínimo o nulo de insumos y/o productos químicos. Este aspecto se evaluó de la siguiente manera:

- 1= Malo (alto requerimiento de insumos y aditivos químicos).
- 3=Regular (Moderado requerimiento de insumos y/o aditivos químicos).
- 5= Excelente (bajo o ningún requerimiento de insumos y/o aditivos químicos).

4.5.2.- Evaluación económica

Los criterios económicos usados fueron los siguientes costos: dosis de coagulante, dosis de floculante o bentonita, disposición final de lodos, consumo de ácido sulfúrico concentrado y consumo de hidróxido de sodio.

En los aspectos económicos se presentan los costos en dólares americanos (USD\$). Los costos consideran el flujo de lixiviados tratados para el volumen actual de la planta de tratamiento de lixiviados del RSBP de 25 m³/día. Se describe el procedimiento que se siguió para los costos de dosificación de coagulante. El mismo procedimiento se siguió para los demás costos.

Se calculó el costo de tratamiento para el tratamiento propuesto. El mayor costo obtenido se definió como “costo máximo” y el menor costo como “costo mínimo”. El intervalo de valores se obtuvo como se describe a continuación. Una vez obtenidos todos los costos se asigna la calificación de cero al costo de tratamiento mayor, y la calificación de 5 al menor costo de tratamiento, de entre los tratamientos propuestos. La diferencia entre el costo más alto y el más bajo obtenido se divide en intervalos igualmente espaciados (cinco) y a cada uno de esos intervalos se le asigna una calificación.

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1.- Extracción del mucílago de nopal

Al desarrollar los procedimientos de extracción de mucílago se obtuvieron en cada uno de ellos un producto seco de color blanco (Figura 5.1), que tiende a adquirir una tonalidad marrón oscura al estar en contacto con el oxígeno del ambiente, por lo que se decidió almacenar el producto en bolsas plásticas herméticas para evitar su deterioro.



Figura 5.1. Fotografía del mucílago de nopal obtenido en la Investigación

Los resultados de los procesos de extracción se registran en la Tabla 5.1, tomando como base de cálculo 10 kg de pencas de nopal. Los procedimientos de extracción se realizaron en tres lotes de pencas de nopal, cada lote fue cosechado de la misma parcela, pero en fechas diferente.

Considerando los promedios de mucílago obtenidos en cada procedimiento de extracción, en relación al nopal usado (10 kg), se estableció que el procedimiento de escaldado obtuvo 94.06 g (0.94%), el procedimiento crudo obtuvo 75.56 g (0.76%) y el procedimiento cocido obtuvo 72.78 g (0.73%); valores inferiores en porcentaje al obtenido por Saenz y Sepulveda (1993), de 1.2% de mucílago, situación atribuible a que el estudio de Saenz y Sepulveda (1993) usaron nopales

de Chile, diferentes en contenido de mucílago a los nopales de México usados en esta investigación.

Tabla 5.1. Resultados obtenidos en los procedimientos evaluados de extracción de mucílago de nopal

Procedimiento 1. Escaldado*					
Etapas	Producto obtenido	Resultado			
		L1	L2	L3	DE
Pelado	Pencas sin cutícula	5630.0 g	5800.0 g	5470.0 g	165.0 g
Molienda y escaldado	Solución de agua y mucílago	5.63 L	5.70 L	5.32 L	0.2 g
Centrifugación, precipitación y secado	Mucílago de nopal	70.65 g	78.14 g	68.41 g	5.1 g
Procedimiento 2. Crudo*					
Etapas	Producto obtenido	Resultado			
		L1	L2	L3	DE
Molienda	Solución de agua y mucílago	14.85 L	14.91 L	14.98 L	0.1 g
Centrifugación, precipitación y secado	Mucílago de nopal	70.15 g	77.39 g	79.14 g	4.8 g
Procedimiento 3. Cocido*					
Etapas	Producto obtenido	Resultado			
		L1	L2	L3	DE
Troceado y cocción	Solución con agua y mucílago	12.82 L	11.02 L	10.45 L	1.2 g
Centrifugación, precipitación y secado	Mucílago de nopal	120.96 g	80.12 g	81.12 g	23.3 g

*Resultados partiendo de 10 kg de nopal crudo. **L1, L2 y L3:** Lotes de pencas de nopal. **DE:** Desviación estandar

Se realizó un análisis de varianza, con intervalo de confianza de 95%, a la cantidad de mucílago obtenido en los procedimientos evaluados para poder establecer si existía diferencia significativa entre ellos, generándose los datos mostrados en la Tabla 5.2.

Ya que el valor obtenido de p fue mayor que el nivel de significancia -0.05- se estableció que no existía diferencia significativa en los procedimientos evaluados, en relación con la cantidad de mucílago obtenido.

Tabla 5.2. ANOVA de los gramos de mucílago extraídos en cada uno de los procedimientos evaluados

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	821.90	411.00	2.08	0.21
Error	6	1182.70	197.10		
Total	8	2004.70			

ANOVA: Análisis de varianza. **Ajust.:** Valor ajustado. **Valor p:** Probabilidad que mide la evidencia de la hipótesis nula. **Valor F:** F de Fisher. Fuente: Minitab

5.2.- Caracterización del mucílago de nopal

Considerando que el mucílago de nopal tiene capacidades coagulantes iguales o mejores que productos sintéticos diseñados para tal fin (Cárdenas, *et al.* 2008; Carpinteyro, 2011) y que es un polímero orgánico natural formado por diferentes carbohidratos, carbohidratos a los que pueden asociárseles su capacidad coagulante (Rodríguez, 2012), es importante establecer cuál de los procedimientos de extracción evaluados fue el que generó un mucílago con mayor contenido de carbohidratos, y por lo tanto mayor poder coagulante. Por lo tanto, para efecto de la caracterización del mucílago de nopal, en relación con su propiedad coagulante, destacan los carbohidratos; sin embargo, se incluyó la caracterización de los parámetros que se evalúan con el análisis proximal para tener una idea más clara de su composición total.

Se realizó la caracterización de los mucílagos generados en tres lotes de nopal, comprados en fechas diferentes, evaluándose: humedad, proteína cruda, lípidos crudos, fibra cruda, cenizas y carbohidratos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.3. Se realizó un análisis de varianza, con intervalo de confianza de 95%, al porcentaje de carbohidratos obtenido en los tres procedimientos de extracción evaluados para poder establecer si existía diferencia significativa en el porcentaje de carbohidratos obtenido. Se obtuvieron los datos de la Tabla 5.4.

Dado que el valor obtenido de p fue 0.0, menor que el nivel de significancia de 0.05, se puede concluir que existen diferencias significativas estadísticamente en al menos un procedimiento de extracción.

Tabla 5.3. Resultados de la caracterización del mucílago de nopal obtenido para cada procedimiento evaluado

Procedimiento	Parámetro (%)											
	Materia seca				Humedad				Proteína cruda			
	L1	L2	L3	DE	L1	L2	L3	DE	L1	L2	L3	DE
1	47.5	47.7	46.1	0.9	52.5	52.3	53.9	0.9	4.7	5.3	4.1	0.6
2	50.0	49.8	48.5	0.8	50.0	50.3	50.3	0.1	7.1	7.1	7.0	0.0
3	51.2	50.8	50.0	0.6	48.8	49.2	50.0	0.6	4.9	4.9	5.4	0.3

Procedimiento	Parámetro (%)											
	Ceniza				Fibra cruda				Carbohidratos			
	L1	L2	L3	DE	L1	L2	L3	DE	L1	L2	L3	DE
1	10.0	10.2	7.3	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	32.3	31.6	33.9	1.2
2	16.4	16.4	16.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	26.1	25.6	24.5	0.8
3	16.2	17.9	16.6	0.9	0.2	0.3	0.3	0.0	28.3	26.1	26.0	1.3

Procedimiento	Parámetro (%)			
	Lípidos crudos			
	L1	L2	L3	DE
1	0.5	0.6	0.8	0.2
2	0.4	0.7	0.5	0.1
3	1.5	1.6	1.8	0.1

L1, L2 y L3: Lotes de pencas de nopal. **DE:** Desviación estandar. Fuente: Laboratorio de Nutrición Animal. Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica. Facultad de Medicina Veterinaria, UNAM

Tabla 5.4. ANOVA del contenido de carbohidratos obtenido en cada procedimiento de extracción evaluado

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	87.29	43.65	34.84	0.00
Error	6	7.52	1.25		
Total	8	94.81			

ANOVA: Análisis de varianza. **Ajust.:** Valor ajustado. **Valor p:** Probabilidad que mide la evidencia de la hipótesis nula. **Valor F:** F de Fisher. Fuente: Minitab

Se realizó la gráfica del porcentaje de carbohidratos obtenido en intervalos usando la desviación estandar agrupada contra cada procedimiento, obteniéndose la gráfica de la Figura 5.2, observándose que el procedimiento de extracción de escaldado fue el que obtuvo el mucílago con un mayor contenido de carbohidratos, y por lo tanto mayor capacidad coagulante.

El procedimiento de extracción 1, escaldado, fue el que se usó para para generar el mucílago que se utilizó en las siguientes etapas de experimentación.

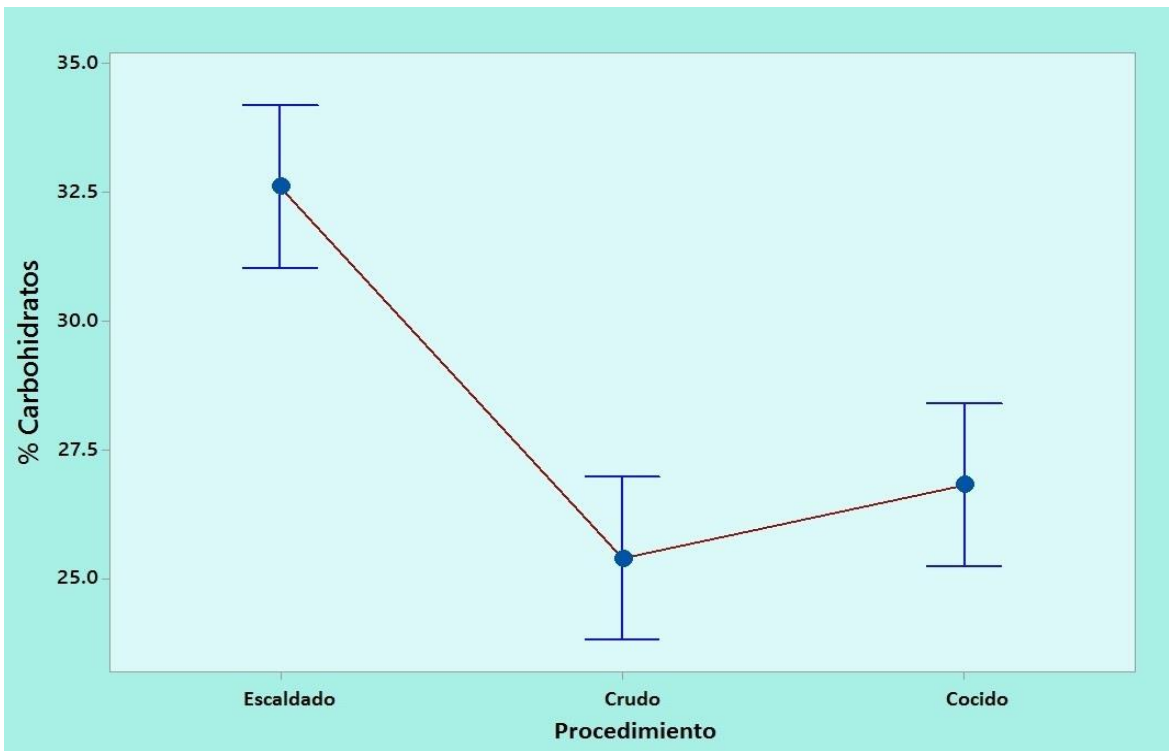


Figura 5.2. Gráfica de intervalos de porcentaje de carbohidratos obtenidos en los procedimientos evaluados de extracción de mucílago de nopal. La desviación estandar agrupada se utilizó para agrupar los intervalos con un intervalo de confianza de 95%

El promedio de contenido de carbohidratos en el procedimiento de escaldado fue de 32.6%. En el caso de las poliaminas -polímeros orgánicos sintéticos-, estas tienen entre un 20% a 50% de contenido de sustancia activa en solución (SNF, 2014).

5.3.- Muestreo de lixiviados

En la Figura 5.3 se muestra una fotografía representativa de los lixiviados muestreados y en la Tabla 5.5 se registran los volúmenes muestreados por fecha.



Figura 5.3. Fotografía de lixiviados muestreados en la etapa III del RSBP

Tabla 5.5. Fechas y volúmenes muestreados de lixiviados en la etapa III del RSBP

Fecha de muestreo	Volumen extraído de lixiviados (L)
26-marzo-2016.	20.0
30-abril-2016.	40.0
28-mayo-2016.	40.0
25-junio-2016.	40.0
15-julio-2016*.	40.0
25-agosto-2016*.	40.0
30-septiembre-2016*.	80.0

*: Muestras de lixiviados usados para su caracterización

5.4.- Caracterización de lixiviados crudos

Los resultados obtenidos de la caracterización de lixiviados, en tres muestras recolectadas del mismo cárcamo recogidas en fechas diferentes generaron los datos mostrados en la Tabla 5.6. Dado que el IB promedio obtenido (0.016) fue menor a 0.1, se puede afirmar que los lixiviados muestreados fueron del tipo maduro o estabilizado.

Tabla 5.6. Resultados de la caracterización de los lixiviados crudos

Parámetro	Resultado				
	M1	M2	M3	DE	Promedio
DQO (mg/L)	2200.00	2025.0	2105.0	87.60	2110.00
DBO ₅ (mg/L)	35.00	34.50	34.90	0.26	34.80
IB	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02
Turbidez (UTN)	54.00	48.0	48.0	3.50	50.00
Color (U Pt-Co)	4200.00	4050.0	4080.0	79.40	4110.00
pH	8.90	8.70	9.10	0.20	8.90

IB: Índice de Biodegradabilidad. **UTN:** Unidades nefelométricas de turbidez. **U Pt-Co:** Unidades de color platino-cobalto. **M1, M2 y M3:** Muestras diferentes de lixiviados. **DE:** Desviación estandar

5.5.- Análisis estadístico

La experimentación se dividió en tres etapas:

- Etapa I. Uso de un coagulante inorgánico comercial (cloruro férrico).
- Etapa II. Uso de un coagulante orgánico comercial (poliamina).
- Etapa III. Uso del mucílago de nopal como coagulante.

Al concluir cada etapa de experimentación se obtuvieron los resultados mostrados en el Anexo 9.1. Adicionalmente, en el Anexo 9.2 se incluyen las tablas con detalles de los datos ingresados y obtenidos a través del programa estadístico Minitab.

Del análisis estadístico de los datos generados se determinaron las variables significativas estadísticamente de acuerdo con el valor de p (probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula) de cada una de ellas En la Tabla 5.7 se muestran los resultados obtenidos.

Se identificaron los términos que fueron significativos estadísticamente en cada etapa de la experimentación:

- Etapa I: pH, Coagulante y Flocculante*Flocculante.
- Etapa II: pH, Coagulante, Flocculante*Flocculante y pH*Coagulante.
- Etapa III: Bentonita, pH*Bentonita y Coagulante*Bentonita.

Tabla 5.7. Resultados del análisis de variables por el modelo de superficie de respuesta

Término	Experimentación		
	Etapas I	Etapas II	Etapas III
Constante	0.000	0.000	0.000
pH	0.000	0.000	0.910
Coagulante	0.032	0.000	0.534
Floculante o bentonita	0.108	0.095	0.000
Floculante (g/L) *Floculante (g/L)	0.003	0.004	VEE
pH *Floculante (g/L)	0.000	VEE	0.000
pH *Coagulante (g/L)	VEE	0.000	VEE
Coagulante(g/L) *Floculante(g/L)	VEE	VEE	0.002

Datos expresados en Valor p: Probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. **VEE:** Variable eliminada estadísticamente al ser no significativa en el modelo. Fuente: Minitab

En la Tabla 5.8 se registran los modelos estadísticos calculados con un intervalo de confianza de 95%.

Tabla 5.8. Modelos estadísticos que describen los datos generados en la experimentación

Experimentación	Modelo estadístico	R ²	Falta de ajuste Valor p
Etapas I	% Remoción DQO = 323.2 - 37.34 pH + 2.022 Coagulante (g/L) - 1417 Floculante (g/L) + 1588 Floculante (g/L) *Floculante (g/L) + 148.4 pH*Floculante (g/L)	0.855	0.716
Etapas II	% Remoción DQO = 164.4 - 18.64 pH - 150.6 Coagulante (g/L) + 1387 Floculante (g/L) - 29758 Floculante (g/L) *Floculante (g/L) + 18.43 pH*Coagulante (g/L)	0.865	0.345
Etapas III	% Remoción DQO = -8.2+ 11.50 pH- 21.69 Coagulante (g/L) + 35.19 Bentonita (g/L)- 5.81 pH*Bentonita (g/L) + 10.06 Coagulante (g/L) *Bentonita (g/L)	0.874	0.06

R²: Coeficiente de determinación. **Valor p:** Probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Fuente: Minitab

Los valores del coeficiente de determinación obtenidos fueron de 0.855, 0.865 y 0.874, para cada etapa de experimentación, lo que puede considerarse correcto para explicar estadísticamente los datos generados. Adicionalmente, se obtuvieron los valores de falta de ajuste. Un modelo es considerado adecuado, en un 95% de nivel de confianza, si el valor de p de la prueba de falta de ajuste es mayor que 0.05 (FCAUNAM, 2002). La falta de ajuste obtenido fue de 0.716, 0.345 y 0.06, respectivamente para cada etapa de experimentación, datos mayores a 0.05, por lo que estadísticamente **los errores de los modelos estadísticos propuestos no fueron significativos.**

Con los modelos estadísticos obtenidos se determinaron las condiciones óptimas de operación de cada etapa de experimentación para la máxima remoción de DQO (Tabla 5.9).

Tabla 5.9. Condiciones óptimas de operación de cada etapa de experimentación para la máxima remoción de DQO

Predicción de maximización de respuesta			
Variable	Experimentación		
	Etapa I	Etapa II	Etapa III
pH	6.0	7.0	6.0
Coagulante (g/L)	3.0	0.5	1.0
Floculante o bentonita (g/L)	0.1	0.023	3.0
% Remoción DQO máxima	68.5	39.3	70.3

Fuente: Minitab

Conviene resaltar los resultados obtenidos en la dosificación de coagulante para la remoción máxima de DQO usando el coagulante inorgánico y el coagulante orgánico natural. Usando una dosificación de una tercera parte (1.0 g/L), en comparación al cloruro férrico (3.0 g/L), el uso de mucílago de nopal lograría una remoción de DQO prácticamente igual a la lograda con cloruro férrico. Sumado a lo anterior debe de considerarse el origen 100% natural del mucílago de nopal, a diferencia del cloruro férrico.

5.6.- Análisis del comportamiento de las variables, interacciones y efectos principales

5.6.1.- Experimentación etapa I. Uso de coagulante inorgánico

5.6.1.1.- Dosis de coagulante

Con los datos generados en la experimentación etapa I se obtuvo la gráfica de contorno mostrada en la Figura 5.4.

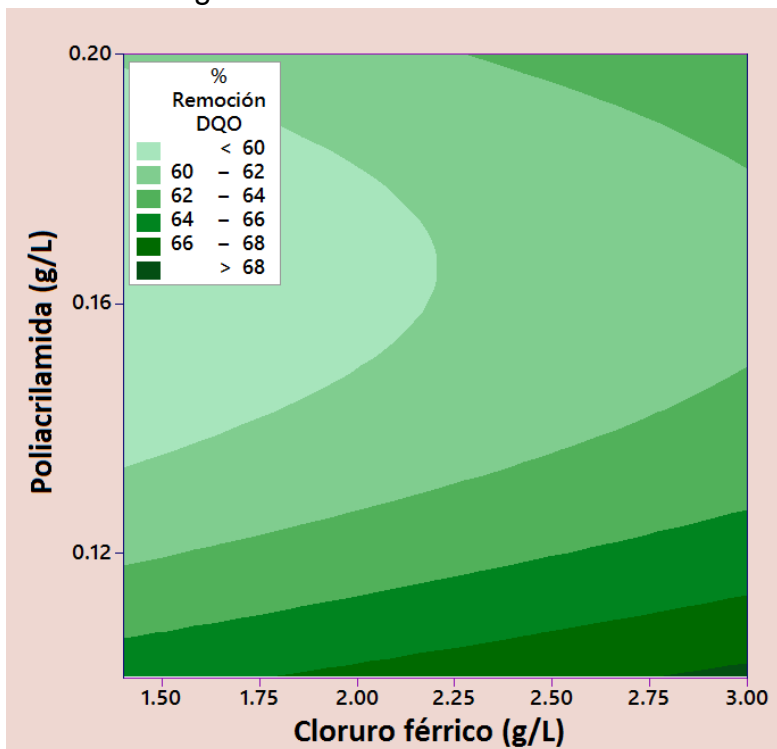


Figura 5.4. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentraciones de cloruro férrico y poliacrilamida. pH de 6.0. Fuente: Minitab

En la Figura 5.4 se observó que, tomando en cuenta la dosificación empleada, a mayores dosis del coagulante se obtuvieron mejores remociones de DQO, llegando a un valor máximo de 69% en una concentración de 3 g/L, aunque conviene mencionar que a una concentración de 1.5 g/L (50% más baja) se alcanzó una remoción de 65% (apenas 5.8% menor que la remoción máxima), lo que hace más rentable económicamente este último resultado.

El mecanismo de coagulación en esta etapa de experimentación podría explicarse como se mencionó en la sección 2.5.1 de este trabajo de tesis: la reacción entre sí

de los productos monoméricos de la hidrólisis del cloruro férrico crea productos poliméricos con carga positiva. Estos polímeros desestabilizan las partículas coloidales con carga negativa presentes en los lixiviados, reduciendo las fuerzas repulsivas. La formación de partículas más grandes comienza a aglomerar las partículas. La masa resultante tiene mayor densidad que los lixiviados, favoreciendo la coagulación.

5.6.1.2.- Dosis del floculante

En la Figura 5.4 se observó que, tomando en cuenta la dosificación empleada, existe una relación inversa entre la dosis del floculante y el porcentaje de remoción de DQO, a menor dosificación, mayor porcentaje de remoción de DQO. La remoción máxima de 69% se logró con una dosis de floculante de 0.10 g/L. Conviene mencionar que se realizaron pruebas preliminares de coagulación con dosis inferiores de floculante; sin embargo, se obtuvieron resultados poco favorables, con valores de Índice de Willcomb de 4 o inferior.

5.6.1.3.- pH

Con los datos generados en la esta etapa de experimentación se generó la gráfica de contorno mostrada en la Figura 5.5, se observó que, tomando en cuenta los valores evaluados de pH, al aumentar su valor disminuyó el porcentaje de remoción de DQO, independientemente de la dosis del coagulante. La remoción máxima de DQO fue de 69% a un pH de 6.0; mientras que para un pH de 7.0, a una misma dosis de coagulante de 0.15 g/L, se logró remover únicamente 44% de DQO (36.2% menor que la remoción máxima). Se confirma la gran influencia del pH en el uso del cloruro férrico como coagulante.

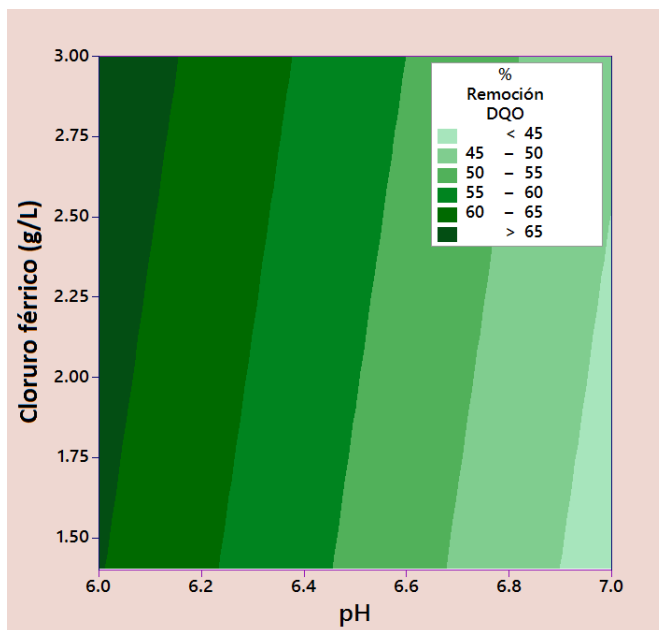


Figura 5.5. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentración de cloruro férrico y pH. Concentración de poliacrilamida de 0.1 g/L. Fuente: Minitab

Se puede asumir que las propiedades ácido-base de los ácidos húmico y fúlvico pueden ser descritas por un número discreto de ácidos mono próticos (Westall *et al.*, 1995); sin embargo, debido a la complejidad de las moléculas de las sustancias húmicas, no se encuentra establecido en la literatura el grado de disociación de éstas a diferentes valores de pH (Cerón, 2016). No obstante, Ritchie y Purdue (2003) determinaron la densidad de carga negativa de las sustancias húmicas, como meq/g °C, en el intervalo de pH de 2.5-11.0 mediante titulación potenciométrica (Tabla 5.10).

Tabla 5.10. Disociación de compuestos con el modelo de MO a diferentes valores de pH

Compuesto modelo (disociación meq/g °C)	pH			
	4.5	5.5	6	8.5
FOOA -AH y AF-	12.5	16	18	21

Disociación expresada en meq/g °C. **FOOA:** Fracción orgánica hidrofóbica ácida. **AH:** Ácidos húmicos. **AF:** Ácidos fúlvicos. **MO:** Materia orgánica. Fuente: Ritchie y Purdue (2003)

En la Tabla 5.10 se observa que a pH 6.0 hay menor densidad de carga negativa o grado de disociación que a pH de 7.0. Sin embargo, de acuerdo a Herbert y Walter (1982), entre pH 6.0 y 7.0 las especie predominante de hierro es la $Fe_2(OH)_2^{+4}$, una especie polimerica que presenta una mayor densidad de carga que las especies monómericas. De ambos efectos el que tiene más peso es la presencia de la especie monómerica, favoreciendo de esta forma la desestabilización de cargas a pH 6.0, incrementando el porcentaje de remoción de DQO.

Además, de acuerdo a Nájera *et al.* (2009) y Nájera *et al.* (2011), tratando lixiviados maduros, con cloruro férrico, obtuvieron también una mayor remoción de DQO a pH de 6.0, evaluando tres valores diferentes (4.0, 4.5 y 6.0). Las remociones máximas obtenidas fueron 67% y 66% para cada estudio, con dosis de cloruro férrico de 1.4 y 2.2 g/L, respectivamente.

5.6.1.4.- Interacciones

Cuando se conjuntan efectos con la misma jerarquía debe decidirse, con base en el conocimiento del proceso, a que interacción se atribuye el efecto observado en el caso que resulte significativo. Otra manera es observar qué efectos principales resultan significativos, ya que estos tienen más probabilidad de estar activos en sus interacciones (Gutiérrez y De la Vara, 2008). Usando los datos generados en la experimentación fue posible establecer las posibles interacciones en cada etapa de la experimentación a través del modelo de superficie de respuesta y el programa estadístico Minitab. En la Figura 5.6 se muestra la gráfica de interacción para la experimentación etapa I.

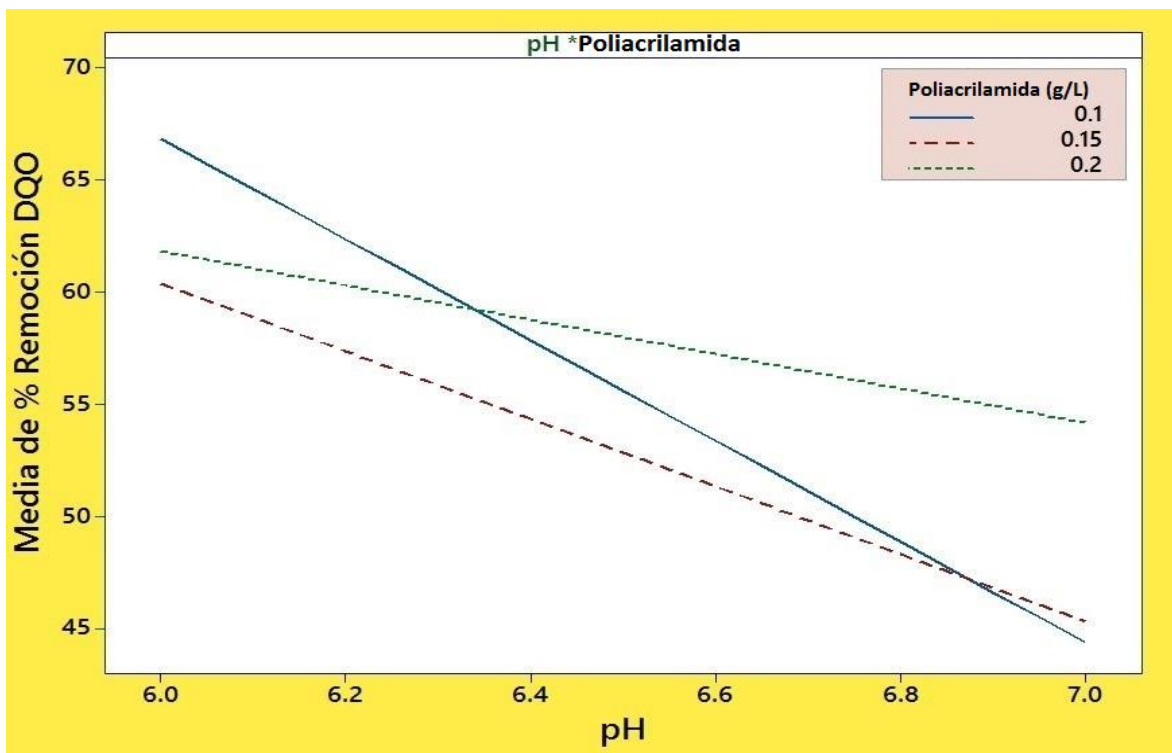


Figura 5.6. Gráfica de interacción para la media del porcentaje de remoción de DQO, experimentación etapa I. Fuente: Minitab

En la Figura 5.6, en el eje de las abscisas, se muestra el intervalo de los valores del primer factor de la interacción (pH), y los valores del segundo factor se muestran directamente en el plano con líneas de forma para cada dosis del floculante (0.10, 0.15 y 0.20 g/L). En el eje de las ordenadas se muestra la variable de respuesta (porcentaje de remoción de DQO). Entre mayor sea la pendiente de las líneas trazadas en el plano, mayor será el efecto del primer factor, y si existe un cambio de signo entre la pendiente de la línea limitada por el segundo factor, entonces el segundo factor de la interacción tendrá un efecto significativo (Trejo, 2012).

En el caso de la interacción de la experimentación etapa I (pH-Floculante), la dosis de floculante (poliacrilamida) no ejerce un efecto significativo porque, aunque tome su valor más alto (0.2 g/L) o su valor más bajo (0.1 g/L), el resultado del porcentaje de remoción de DQO no cambia en forma notable. Sin embargo, el mejor resultado para esa prueba se obtuvo cuando el pH fue el mínimo (6.0) y la dosis de floculante fue de 0.1 g/L, para obtener una remoción de DQO de aproximadamente 67.0%.

5.6.1.5.- Efectos principales

A través del programa estadístico Minitab se generaron las gráficas de efectos principales de pH, dosis de coagulante y dosis del floculante sobre el porcentaje de remoción de DQO, obteniéndose la Figura 5.7.

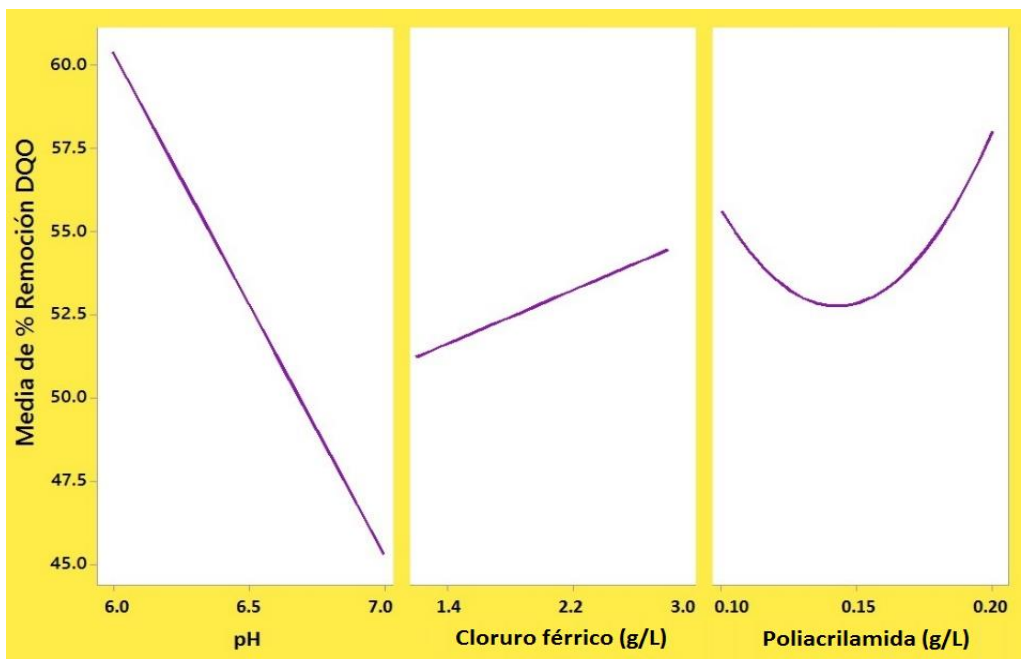


Figura 5.7. Gráfica de efectos principales para el porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa I. Fuente: Minitab

En las gráficas mostradas en la Figura 5.7 se observó que la remoción de DQO, al usar cloruro férrico como coagulante, estuvo influida de forma inversa por el pH (como era predecible): a menor pH, mayor remoción de DQO, presentándose la mayor remoción a pH de 6.0. En menor medida tuvo influencia la dosis del coagulante: a mayor dosis, mayor remoción; presentándose la mayor remoción a 3.0 g/L. En relación con la dosis del floculante se logró la mayor remoción a 0.20 g/L.

5.6.2.- Experimentación etapa II. Uso de coagulante orgánico comercial

5.6.2.1.- Dosis de coagulante

Con los datos generados en esta etapa de experimentación se obtuvo la gráfica de contorno mostrada en las Figura 5.8.

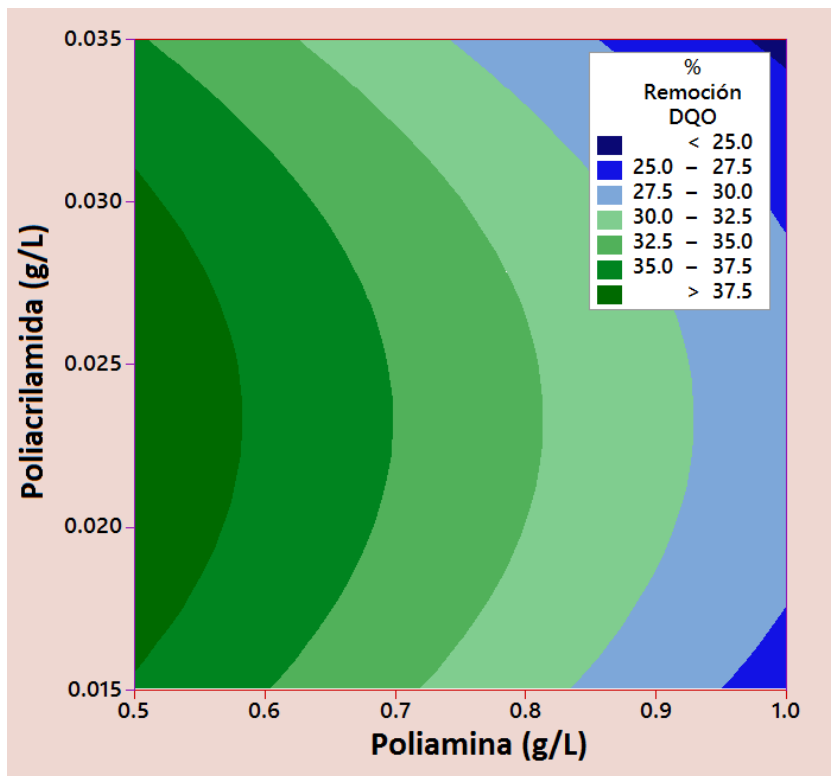


Figura 5.8. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentraciones de poliamina y poliacrilamida. pH de 7.0. Fuente: Minitab

Se observó que, tomando en cuenta la dosificación empleada, a mayores dosis del coagulante se obtuvieron menores remociones de DQO, llegando a una remoción máxima de 38% con una concentración de 0.5 g/L. Conviene mencionar que en las pruebas preliminares de coagulación se evaluó una concentración de coagulante de 0.4 g/L, obteniéndose un índice de Willcomb de 6.0 y flóculos tipo A, en el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra, señal de un deficiente proceso de coagulación.

El hecho de que a mayores dosis de coagulante se obtengan menores remociones de DQO puede atribuirse a un exceso de concentración del coagulante, dando lugar

a una reestabilización de las partículas coloidales. Esta situación se presenta al dosificar cantidades mayores a 0.5 g/L de coagulante. Conviene resaltar que las remociones de DQO alcanzadas con el uso de la poliamina fueron inferiores en comparación al uso del cloruro férrico y el mucílago de nopal, alcanzando una remoción máxima de apenas 38%, valor 81.5% inferior que al usar cloruro férrico (con remoción máxima de 69% de DQO) y 89.5% menor que al usar mucílago de nopal (con remoción máxima de 72%).

El mecanismo de interacción entre coloides y el polímero orgánico de poliamina puede ser explicado por adsorción y puenteo, como se reporta en bibliografía (Bolto y Gregory, 2007).

5.6.2.2.- Dosis del floculante

En la Figura 5.8 se observó el comportamiento de la dosis del floculante, en relación con el porcentaje de remoción de DQO. Tomando en cuenta la dosificación empleada, se observó que en el rango entre 0.16 g/L a 0.32 g/L de floculante se obtuvieron remociones entre a 35% y 38%. Desde un punto de vista económico sería más rentable usar la menor dosificación, es decir 0.16, para alcanzar un 35% de remoción de DQO. Al comparar la remoción alcanzada usando poliamina con la lograda usando cloruro férrico su valor fue más bajo.

5.6.2.3.- pH

Con los datos generados en esta etapa de experimentación se generó la gráfica de contorno mostrada en la Figura 5.9. Tomando en cuenta los valores evaluados, se estableció que, a menor valor de pH, mayor remoción de DQO; aunque la mejoría solo fue de un 26%, pasando de un 30% a un 38% de remoción de DQO. Aun así, el valor máximo de remoción de DQO alcanzado, de un 38%, fue inferior en un 44.9% y en un 47.2% al logrado usando cloruro férrico y mucílago de nopal, de un 69% y un 72% de remoción máxima de DQO, respectivamente.

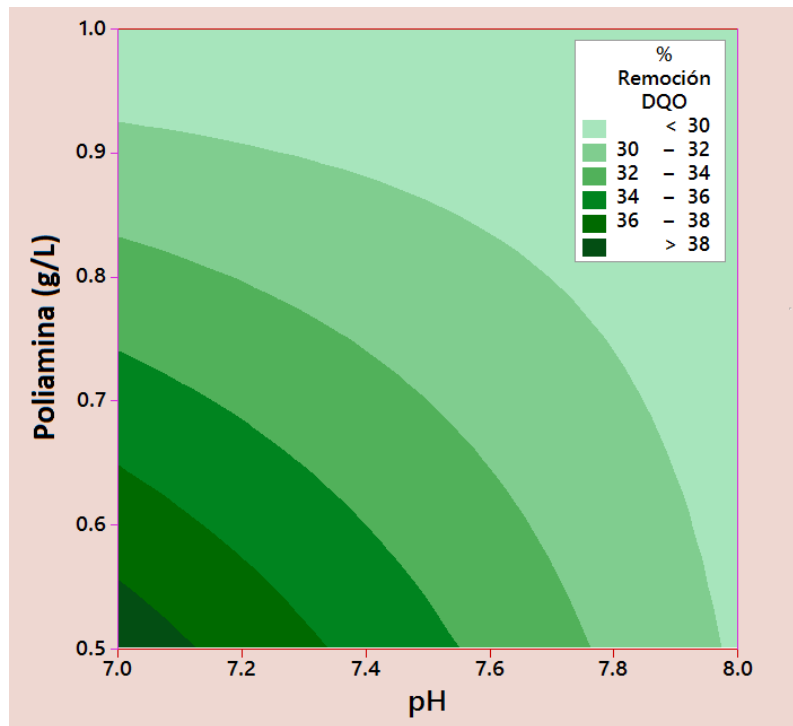


Figura 5.9. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentración de poliamina y pH. Concentración de poliácridamida de 0.025 g/L. Fuente: Minitab

Los resultados obtenidos confirman lo afirmado por Hendricks (2006) y Cerón (2016), de que los polímeros orgánicos catiónicos aplicados a la coagulación (caso de la poliamina usada en esta etapa de experimentación) tienen poca dependencia del pH en relación con su efectividad de remoción de materia orgánica, afirmando que las cadenas poliméricas están cargadas positivamente para realizar el proceso de coagulación, independientemente del valor de pH.

5.6.2.4.- Interacciones

En la Figura 5.10 se muestra la gráfica de interacción para la experimentación etapa II, señalándose la interacción pH*Coagulante como significativa estadísticamente.

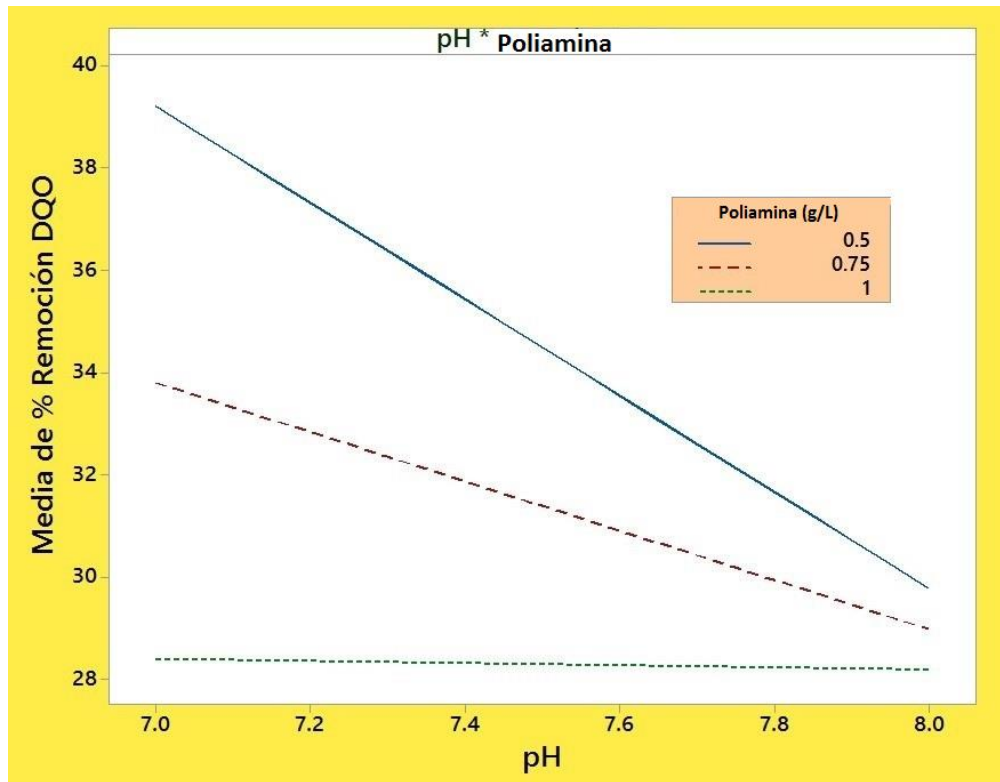


Figura 5.10. Gráfica de interacción para la media del porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa II. Fuente: Minitab

El análisis de la Figura 5.10 es el siguiente: las líneas rectas con un mismo signo de pendiente indicarían una influencia del primer factor (pH). A una dosis del coagulante de 1.0 g/L prácticamente se obtiene una línea horizontal, lo que indica que el pH no tiene influencia sobre la remoción de DQO. En el caso de usarse una dosis de coagulante de 0.75 g/L la remoción de DQO varía apenas de un 30% a un 34%, en función del pH. En el caso de usarse una dosis de 0.5 g/L de coagulante se puede observar que la remoción de DQO varía de un 31% a un máximo de 39%, en función del pH. Considerando lo anterior se puede afirmar que el pH no es un factor de influencia, ya que un cambio de su valor no genera modificaciones considerables en el porcentaje de remoción de DQO. En relación con la dosis del

coagulante se genera una influencia mayor, ya que modificaciones en su valor generan variaciones en el porcentaje de remoción de DQO de un 28% a un 39%. La máxima remoción de DQO (aproximadamente de 39%) se obtendrá en los valores mínimos de pH (7) y de dosis de coagulante (0.5 g/L).

5.6.2.5.- Efectos principales

A través del programa estadístico Minitab se generaron las gráficas de efectos principales de pH, dosis de coagulante y dosis del floculante sobre el porcentaje de remoción de DQO, obteniéndose la Figura 5.11.

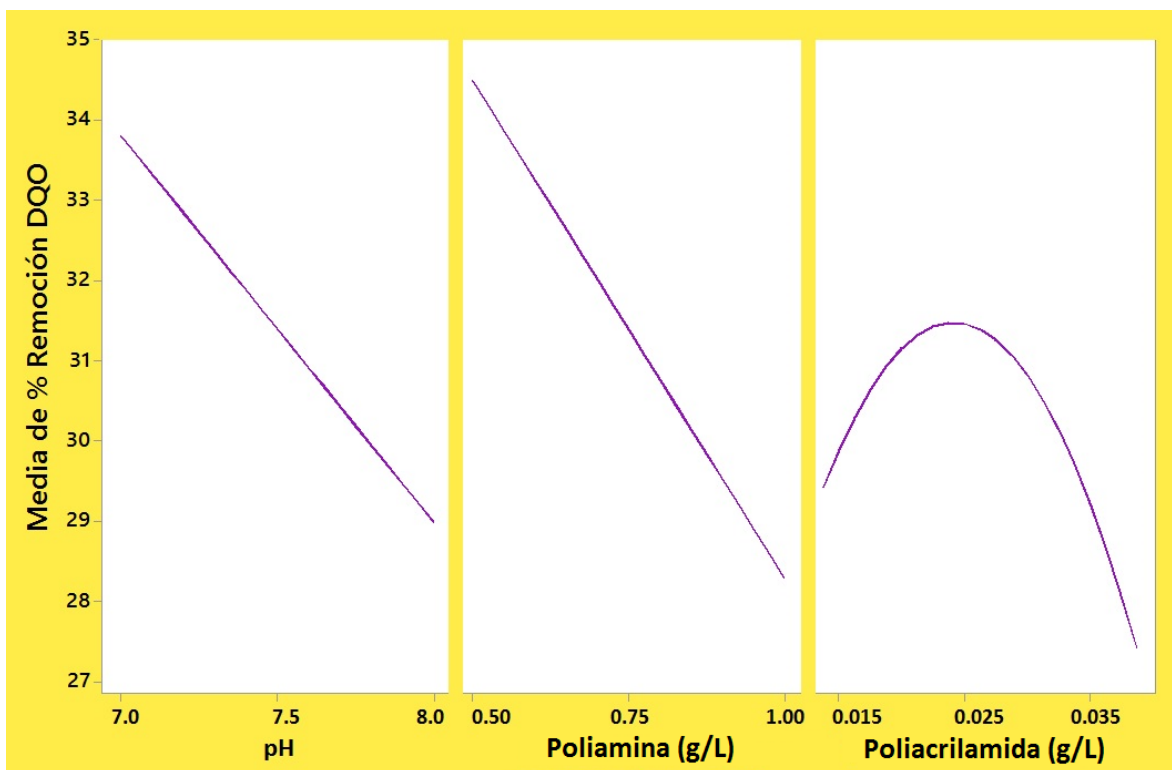


Figura 5.11. Gráfica de efectos principales para las medias del porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa II. Fuente: Minitab

En las gráficas mostradas en la Figura 5.11 se observó que la remoción de DQO, al usar el coagulante orgánico comercial, estuvo influida en forma inversa por el pH y por la dosis del coagulante. Las mayores remociones se lograron en los valores más bajos: pH 7.0 y dosis de coagulante de 0.50 g/L. En el caso de la dosis del floculante se logró la remoción máxima a 0.023 g/L.

5.6.3.- Experimentación etapa III. Uso de coagulante orgánico natural

5.6.3.1.- Dosis de coagulante

De los datos generados en la experimentación etapa III se obtuvo la gráfica de contorno mostrada en las Figura 5.12.

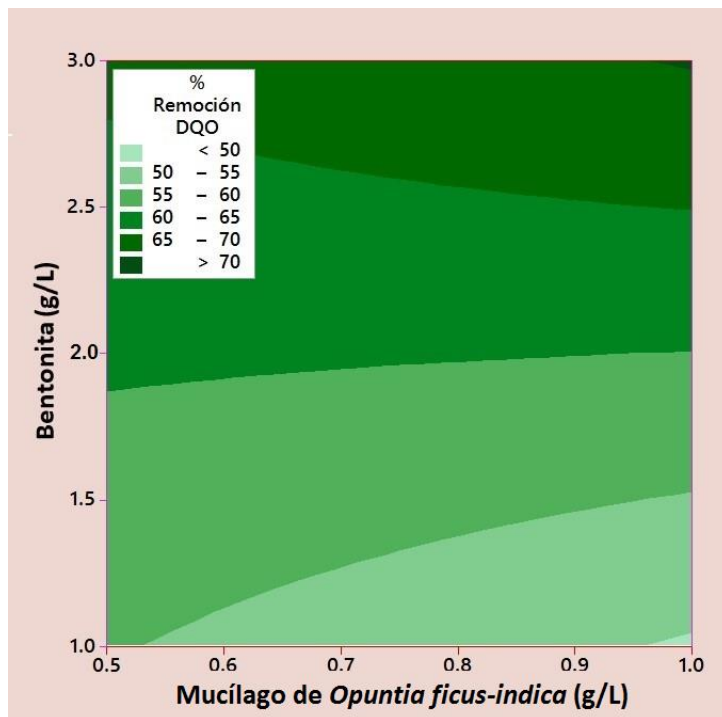


Figura 5.12. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentraciones de mucílago de *Opuntia ficus-indica* y bentonita. pH de 6.0. Fuente: Minitab

En la gráfica mostrada en la Figura 5.12 se observó que, tomando en cuenta la dosificación empleada, a mayor dosis del coagulante se obtuvieron mayores remociones de DQO, llegando a una remoción máxima de 72% en una concentración de 1.0 g/L. Conviene resaltar que con una concentración de 0.5 g/L de coagulante (50% más baja) se obtuvo una remoción de DQO de 65% (9.7% menor que la remoción máxima), situación más viable económicamente.

El mecanismo de interacción entre los coloides y el mucílago de nopal podría ser el de formación de puentes, como se reporta en bibliografía (Bolto y Gregory, 2007), es decir cadenas poliméricas que desestabilizan a las partículas estables formando un puente entre éstas para dar origen a los denominados flóculos. En una primera

etapa el polímero al ser soluble es dispersado. Luego, el polímero es adsorbido por las partículas coloidales y se forman puentes entre las partículas y el polímero. En una última etapa los puentes se acercan y se multiplican, formándose los flóculos.

5.6.3.2.- Dosis del floculante

En las Figura 5.12 se observó que, tomando en cuenta la dosificación empleada, el mayor porcentaje de remoción de DQO se presentó al agregar la mayor dosis de bentonita (3.0 g/L), combinándose con el efecto del coagulante en su máxima dosis (1.0 g/L). Se observó que con una dosis de bentonita de 2.0 g/L (33.3% menor) fue posible obtener un porcentaje de remoción de 65% (9.7% menor que la remoción máxima de 72%), situación más viable económicamente.

Lainés *et al.* (2008) afirman que las arcillas son adsorbentes que pueden utilizarse para ayudar en la coagulación de aguas que contengan color intenso o baja turbiedad, como es el caso de los lixiviados muestreados en el RSBP, razón por la que se usó bentonita para favorecer la coagulación, favoreciendo el proceso. Lorenzo-Acosta (2006) propone que, al aumentar el material en suspensión, lo que sucede al agregar bentonita, se favorece la floculación aumentando la frecuencia de las colisiones y el peso de los flóculos, los flóculos así formados son capaces de sedimentar rápidamente debido su alto peso específico. Además, Acosta (2006) propone que el uso de bentonita generó un beneficio adicional: debido a sus propiedades adsorbentes, fue posible aumentar la remoción de DQO en los lixiviados, al adsorber fracciones de materia orgánica.

5.6.3.3.- pH

Con los datos obtenidos en esta esta etapa de experimentación se generó la gráfica de contorno mostrada en las Figura 5.13.

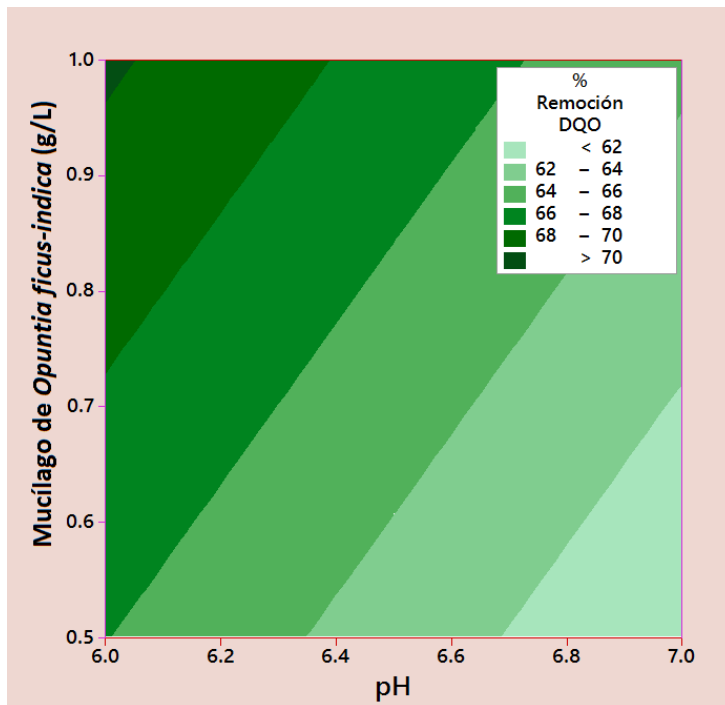


Figura 5.13. Gráfica de contorno de porcentaje de remoción DQO vs. Concentración de *Opuntia ficus-indica* y pH. Concentración de bentonita de 3.0 g/L. Fuente: Minitab

Se observó que, tomando en cuenta los valores evaluados de pH, el porcentaje de remoción de DQO varió entre 72% a 61%, siendo esta variación de apenas un 15.2%, estaleciendose por lo tanto que el pH no tuvo una gran influencia en el proceso. De acuerdo a Carpinteyro (2011), evaluando polímeros orgánicos naturales (mucílago de nopal, gomas de guar, mezquite y algarrobo) en tratamiento de aguas residuales, afirma que el pH tiene poca influencia en el proceso de coagulación, aseveración confirmada con los resultados obtenidos en este trabajo de tesis.

Es posible establecer que la eficiencia de acción del mucílago de nopal con bentonita depende muy poco del pH, a diferencia del cloruro férrico, que si se vió afectado. Esta poca dependencia del pH puede ser considerada como una ventaja para su utilización, al no ser necesario el consumo de reactivos químicos para acondicionar los lixiviados. En la sección 5.6.3.5 de este trabajo de tesis (efectos principales) se incluye la Figura 5.15 (Gráfica de efectos principales para las medias

de porcentaje de remoción de DQO, experimentación etapa III), en donde se confirma esta afirmación.

5.6.3.4.- Interacciones

En esta etapa de experimentación las interacciones significativas fueron: pH*Bentonita y Coagulante*Bentonita (Figura 5.14).

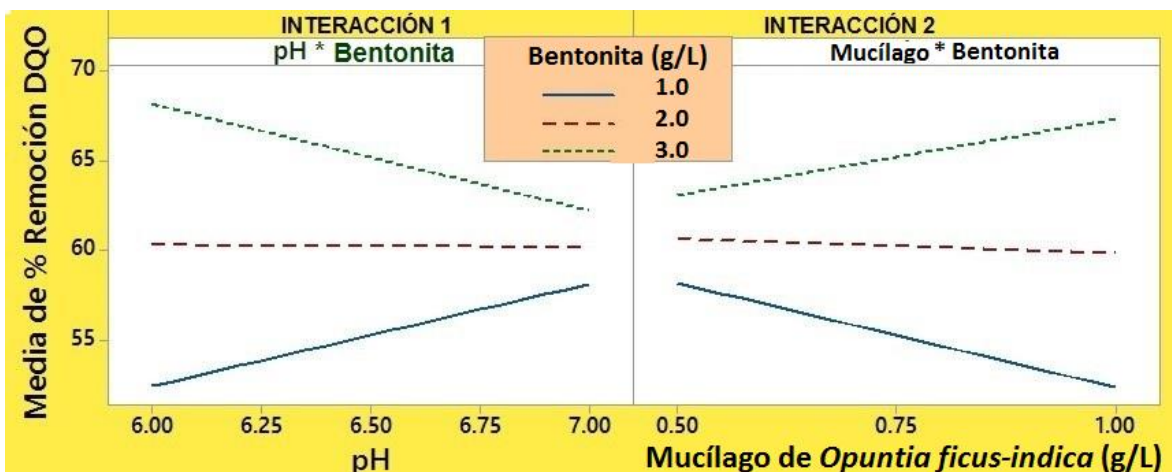


Figura 5.14. Gráficas de interacción para la media del porcentaje de remoción DQO, experimentación etapa III. Fuente: Minitab

El análisis de la Figura 5.14 es el siguiente: en ambas interacciones analizadas (pH*Bentonita y Coagulante*Bentonita) existe al menos una pendiente de recta con signo diferente, lo que indica que el segundo factor es el significativo (dosis de bentonita en ambos casos). Sin embargo, la variación del primer factor en ambos casos (pH y Coagulante, respectivamente) genera también cambios en el porcentaje de remoción de DQO, siendo la dosis de bentonita el efecto de mayor importancia, ya que en ambas interacciones en al menos un caso existe una línea recta casi horizontal, lo que indica que el primer factor (pH y Coagulante, respectivamente) no son significativos.

La máxima remoción de DQO se obtuvo, en el caso de la primera interacción, en un valor de aproximadamente de 69%, con un pH mínimo (6.0) y una dosis de bentonita máxima de 3.0 g/L. En el caso de la segunda interacción, la remoción de DQO máxima fue de aproximadamente 69%, a dosis máximas de coagulante y bentonita (1.0 g/L y 3.0 g/L, respectivamente).

5.6.3.5.- Efectos principales

A través del programa estadístico Minitab se generaron las gráficas de efectos principales de pH, dosis de coagulante y dosis del floculante sobre el porcentaje de remoción de DQO, obteniéndose la Figura 5.15.

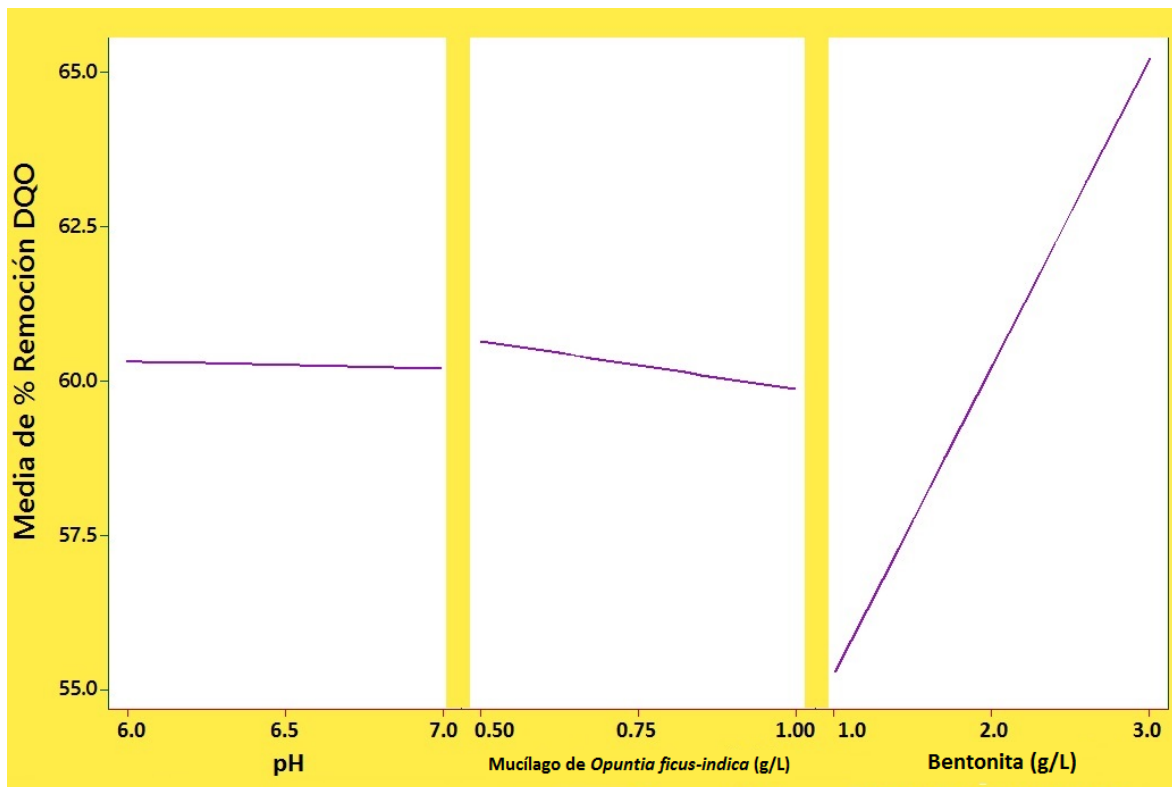


Figura 5.15. Gráfica de efectos principales para las medias de porcentaje de remoción de DQO, experimentación etapa III. Fuente: Minitab

En las gráficas mostradas en la Figura 5.15 se observó que la remoción de DQO, al usar el coagulante orgánico natural, prácticamente no estuvo influida por el pH, ni por la dosis de coagulante. El factor que sí tuvo una influencia significativa fue la dosis de la bentonita, ya que su adición favoreció la remoción de DQO, obteniéndose la mayor remoción a 3.0 g/L.

5.7.- Tratamiento de lixiviados

Con los datos generados en la etapa de experimentación fue posible elaborar las gráficas del efecto del tratamiento de cada coagulante, usando los parámetros de caracterización de los lixiviados, antes y después de cada tratamiento: DQO, color,

turbiedad, DBO₅, IB y cantidad de lodos generados. Se describen a continuación las gráficas generadas en cada etapa de experimentación.

5.7.1.- DQO

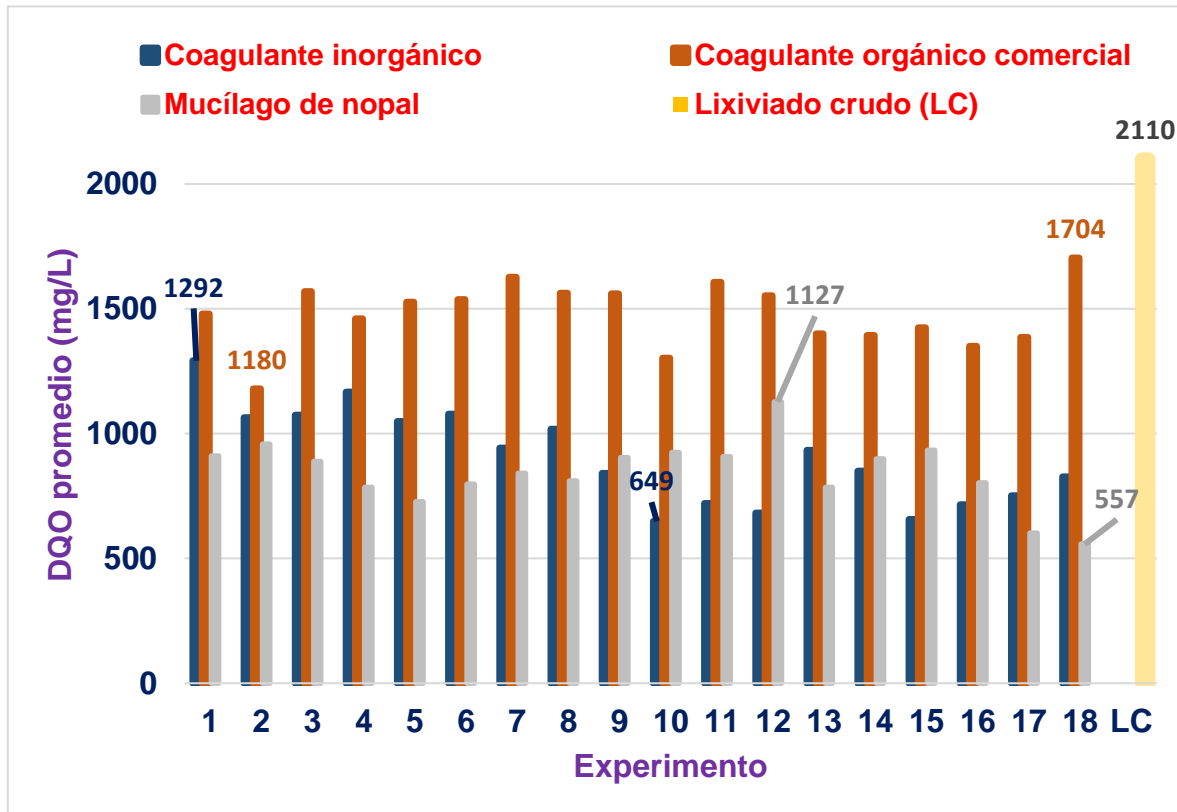


Figura 5.16. Gráfica del comparativo de valores de DQO en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes

5.7.2.- Color

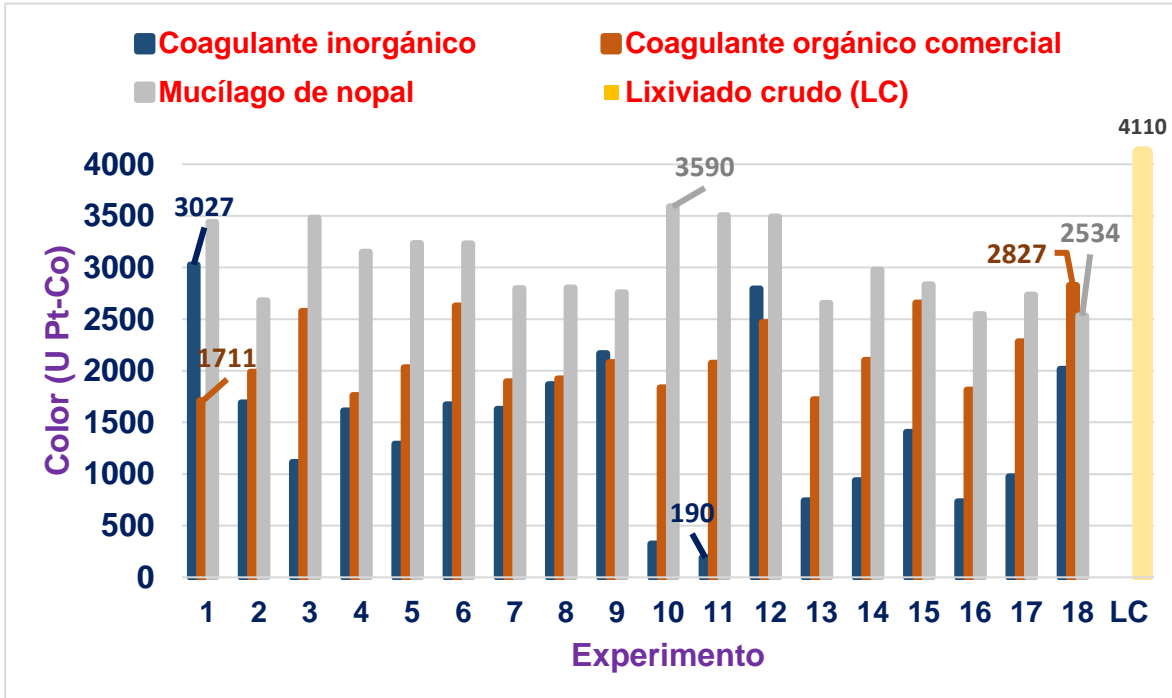


Figura 5.17. Gráfica del comparativo de valores de color en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes. U Pt-Co: Unidades de color platino-cobalto

La mejor forma de entender el comportamiento de las gráficas de las Figura 5.16 y 5.17 es observar visualmente la remoción de color y DQO en muestras de lixiviados (Figura 5.18).

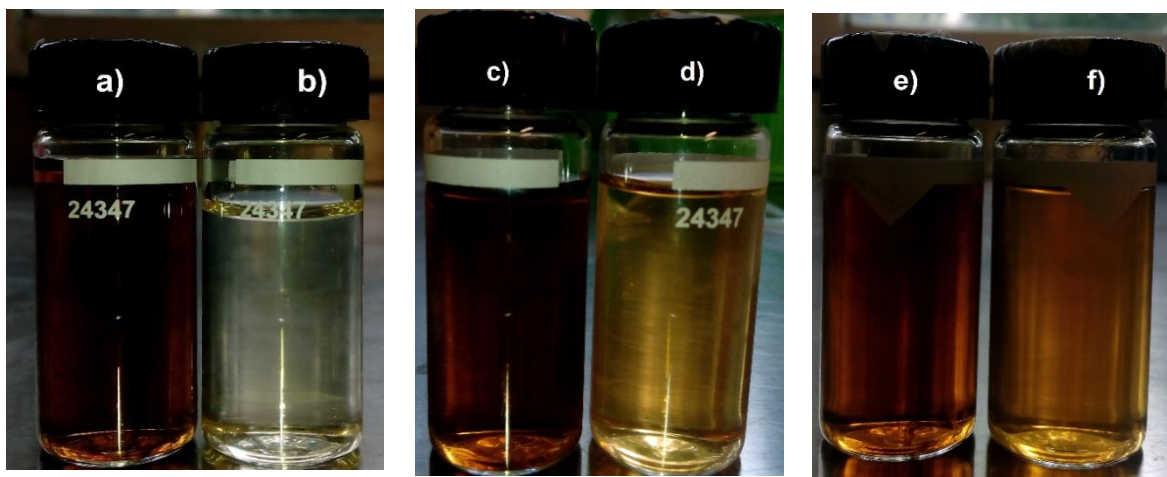


Figura 5.18. Fotografías representativas del tratamiento en lixiviados usando tres coagulantes diferentes

En la Figura 5.18 se observan los resultados de los tres de los tratamientos. Los incisos **a)**, **c)** y **e)** son imágenes de lixiviados crudos con color de 4,110 U Pt-Co y DQO de 2,110 mg/L. En la imagen **b)** se observan los lixiviados después del tratamiento con cloruro férrico con color de 170 U Pt-Co y DQO de 740 mg/L (remociones de color y DQO de 95.8% y 64.9%, respectivamente). En la imagen **d)** se observa los lixiviados tratados con coagulante orgánico sintético con color de 1,630 U Pt-Co y DQO de 1,430 mg/L (remociones de color y DQO de 60.3% y 32.2%, respectivamente). Finalmente, en la imagen **f)** se ven los lixiviados después de haber sido tratado con mucílago de nopal y bentonita con color de 2,310 U Pt-Co y DQO de 590 mg/L (remociones de color y DQO de 43.8% y 72.0%, respectivamente).

Se observa que el tratamiento logró la mayor remoción de color (95.8%) fue usando cloruro férrico a 2.2 g/L a pH de 6.0, removiendo 64.9% de DQO. Esta situación es atribuible a una remoción de la mayoría de AH presentes, que son los que aportan un color más intenso a los lixiviados, de forma que la materia orgánica aún presente en los lixiviados ($100\% - 64.5\% = 35.1\%$) representa los AF, responsable del color presente aún. Esta situación se confirma el valor ácido de los lixiviados tratados, que fue de 3.2, y dado que los AH son insolubles en esta condición, se favoreció su precipitación. La gran remoción de color alcanzada podría ser explicada por la poca coloración que aportan los AF, en comparación a los AH, lo que podría sugerir que en los lixiviados crudos existen comparativamente más AH que AF.

Con el tratamiento de poliamina, usando 0.5 g/L a pH de 8.0, se lograron remociones de color y de DQO de 60.3% y 32.2%, respectivamente; con lixiviados tratados a pH de 8.1. Podría considerarse que la menor disminución de color, en comparación al uso de cloruro férrico, es atribuible a la menor remoción de AH, debido a su solubilidad al pH obtenido. Podría atribuirse a la materia orgánica no removida (67.8%) la responsabilidad del color presente aún, en la que deben de estar incluidos AH y AF.

Finalmente, con el tratamiento de mucílago de nopal, usando 1 g/L a pH de 6.0, se obtuvieron remociones de color y de DQO de 43.8% y 72%, respectivamente; con lixiviados tratados a pH de 7.5. La gran remoción de DQO, incluso ligeramente mayor que la alcanzada usando cloruro férrico, podría ser atribuible a la efectividad del mucílago de nopal en la remoción de AF y necesariamente de la mayor parte de los AH, ya que es la única forma de explicar el valor alto de remoción. En relación con la poca remoción de color, en comparación a los otros dos tratamientos, el porcentaje de materia orgánica no removida (28%) debe ser la responsable del color presente aún, debiendo incluir necesariamente la fracción de AH que tendría la mayor responsabilidad del color.

La explicación a las diferencias en el tipo de materia orgánica removida con cada coagulante debe estar relacionada a los diferentes mecanismos de acción, que desestabilizan y remueven la materia orgánica de forma diferente (sección 2.5.1 de este trabajo de tesis). Si bien es cierto que en este estudio no se incluyó el análisis de mecanismos y la cuantificación y diferenciación de los AH y AF presentes en los lixiviados, de acuerdo con los resultados obtenidos de remoción de materia orgánica, si puede sugerirse que una mínima parte (fracción de los AH) debe ser la responsable de la mayoría del color. Se plantea la posibilidad de realizar investigaciones a detalle que aborden estos temas y que confirmen esta afirmación.

5.7.3.- Turbiedad

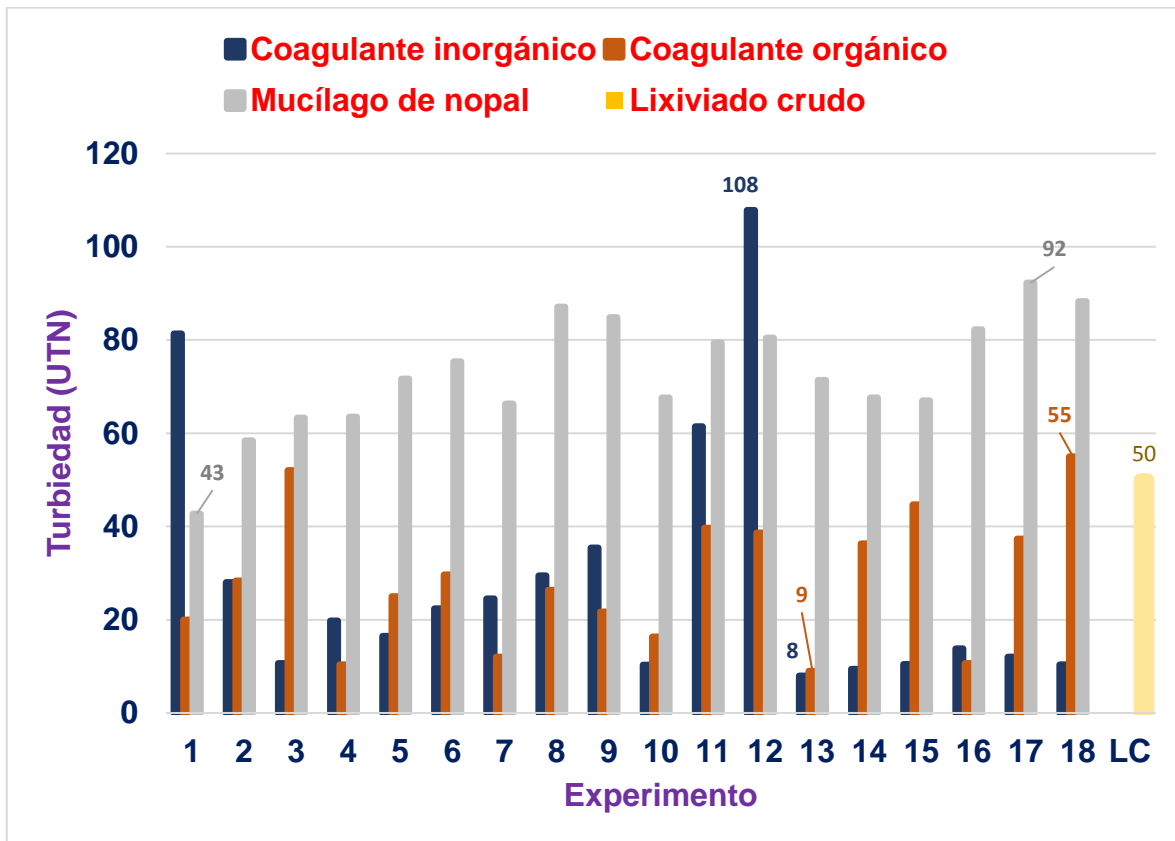


Figura 5.19. Gráfica del comparativo de valores de turbiedad en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes

En la Figura 5.19 se observó que el uso del coagulante orgánico comercial como coagulante disminuyó la turbiedad de los lixiviados en prácticamente todos los experimentos, salvo en los experimentos 3 y 18. Este aumento de turbiedad podría atribuirse a una sobredosificación del coagulante, generando una reestabilización de los coloides. En el tratamiento con coagulante inorgánico en los experimentos 1, 11 y 12 hubo un aumento de turbiedad, situación que podría atribuirse a la misma causa, una sobredosificación de coagulante.

En los experimentos que se usó mucílago de nopal hubo prácticamente un aumento de turbiedad en todos los experimentos, salvo en el experimento 1. Esta situación podría atribuirse a que el mucílago de nopal en su composición tuvo solo un $32.6\% \pm 1.2$ de carbohidratos (sección 5.2 de este trabajo de tesis), carbohidratos

que fueron los que generaron la acción coagulante, el restante 67.4% (cenizas, fibra, lípidos y proteínas) incluyó componentes que podrían haber elevado la turbiedad, caso de los lípidos y de la fracción insoluble de las fibras y proteínas.

5.7.4.- DBO₅

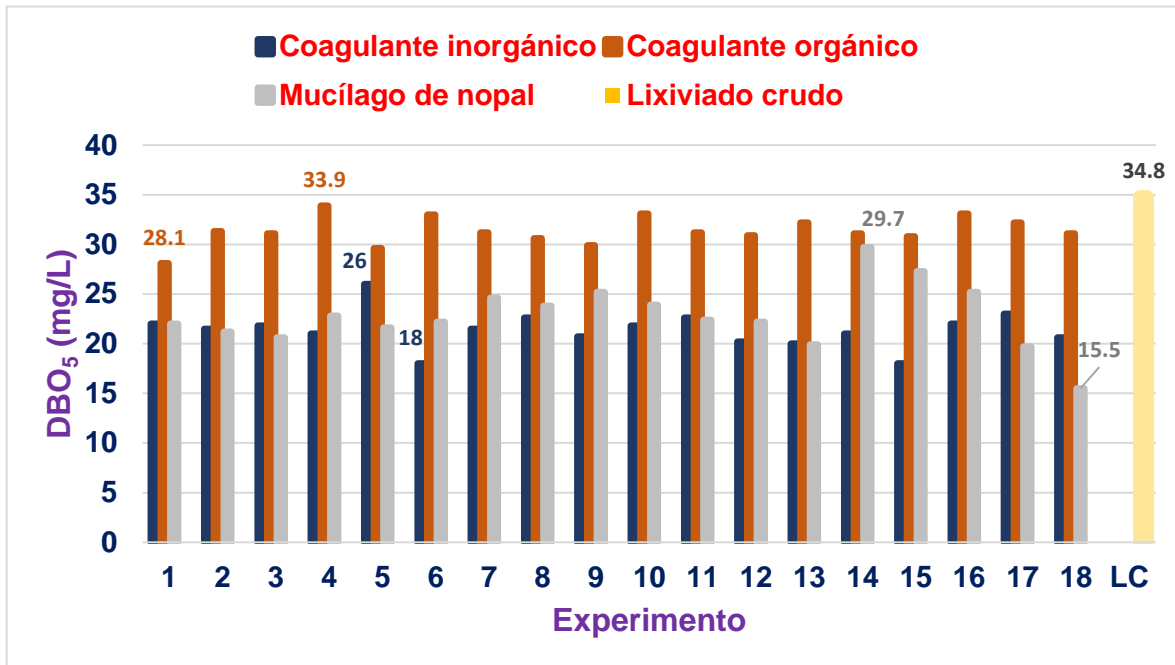


Figura 5.20. Gráfica del comparativo de valores de DBO₅ en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes

5.7.5.- Índice de Biodegradabilidad

Con los datos de las gráficas de las Figuras 5.16 y 5.20 (DQO y DBO₅) se generaron los datos del IB (Figura 5.21). Considerando los experimentos en los que hubo la mayor remoción de DQO, usándose cloruro férrico (experimento 11), se obtuvo un IB de 0.031. Usando poliamina, en el experimento 1, se obtuvo un IB de 0.019 y utilizándose mucílago de nopal con bentonita, experimento 18, se obtuvo un IB de 0.028.

Se observó que el caso del uso de poliamina (coagulante orgánico comercial) prácticamente no hubo modificación del IB, pasando de 0.016 a 0.019, como era de esperarse en un tratamiento de que no incluyó oxidación alguna, por lo que la remoción de la materia orgánica se explica por la remoción de AH y AF, pero no por

La transformación de materia orgánica recalcitrante a material más biodegradable. En el caso del uso de cloruro férrico y mucílago de nopal se obtuvieron valores IB de 0.031 y 0.028, respectivamente. Este ligero aumento del IB parecería estar en contradicción con lo esperado en procesos de tratamiento en los que no se realizó oxidación.

La explicación al aumento del IB podría atribuirse, en el caso de uso de cloruro férrico, a la posible eliminación de algún compuesto inhibitorio durante el tratamiento, favoreciéndose el crecimiento de microorganismos durante la cuantificación de la DBO₅, incrementándose su valor. Dado que esta investigación no consideró aspectos microbiológicos se propone la realización de estudios que evalúen esta alternativa.

En el caso del uso de mucílago de nopal esta situación podría atribuirse al incremento de la materia orgánica biodegradable debido al aporte que hace el mucílago de nopal que no logra coagular y permanece en solución con los lixiviados; además, debe de considerarse que al dosificar el mucílago de nopal se están agregando elementos orgánicos que no tienen propiedades coagulantes (lípidos, proteínas y fibras), pero si aportan materia orgánica biodegradable a los lixiviados (sección 5.2). De cualquier forma, en las tres etapas de experimentación los valores de IB en todos los experimentos estuvieron por debajo de 0.1, lo que no indica que los procesos de coagulación no modificaron la estabilidad de los lixiviados.

5.7.6.- Cantidad de lodos generados

En relación con los lodos generados (Figura 5.22) se observó que el uso de cloruro férrico como coagulante fue el tratamiento que generó mayor cantidad de lodos, con valores de 12.1 a 48.9 g/L de lixiviados tratados, dependiendo del experimento. El uso de coagulante orgánico comercial generó cantidades de lodos de 3.9 a 7.1 g/L de lixiviados tratados. El uso de mucílago de nopal generó cantidades de lodos de 5.5 a 16.3 g/L de lixiviados tratados. Estos resultados confirman lo expuesto por Hendricks (2006) y Bolto y Gregory (2007) de que el uso de coagulantes orgánicos producen menor cantidad de lodos que el uso de coagulantes inorgánicos.

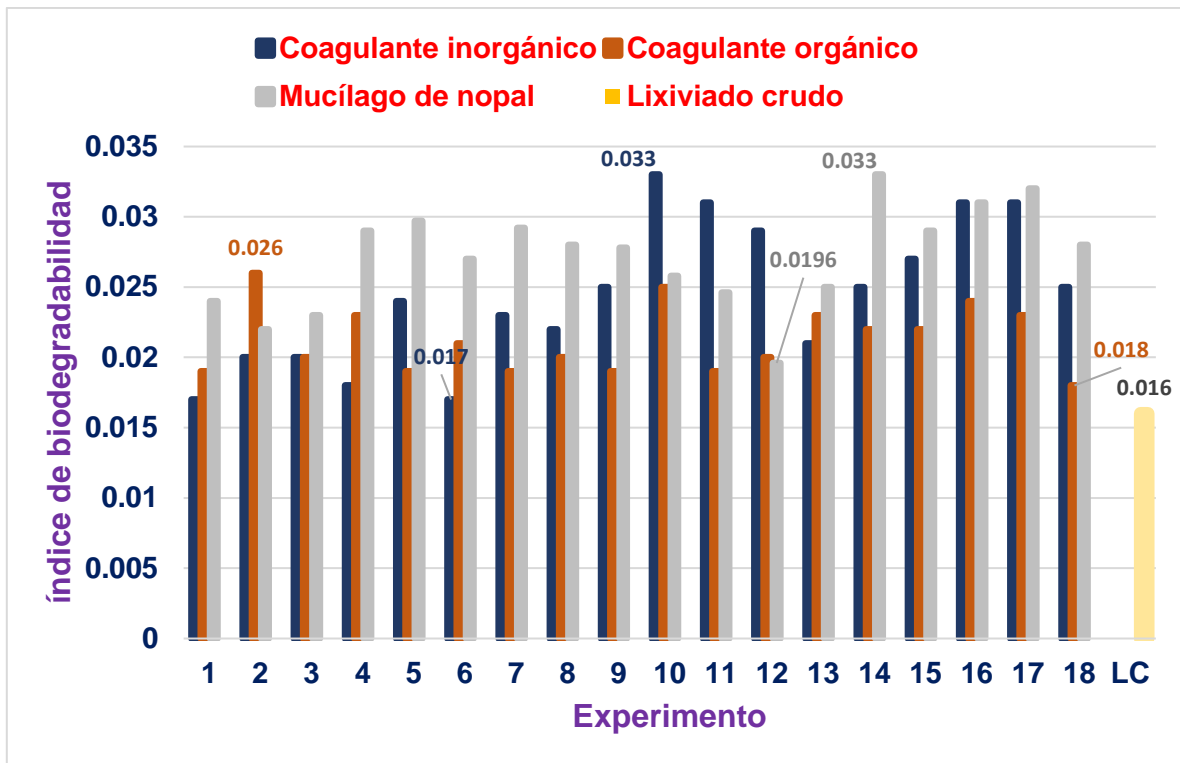


Figura 5.21. Gráfica del comparativo de valores del índice de Biodegradabilidad en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes

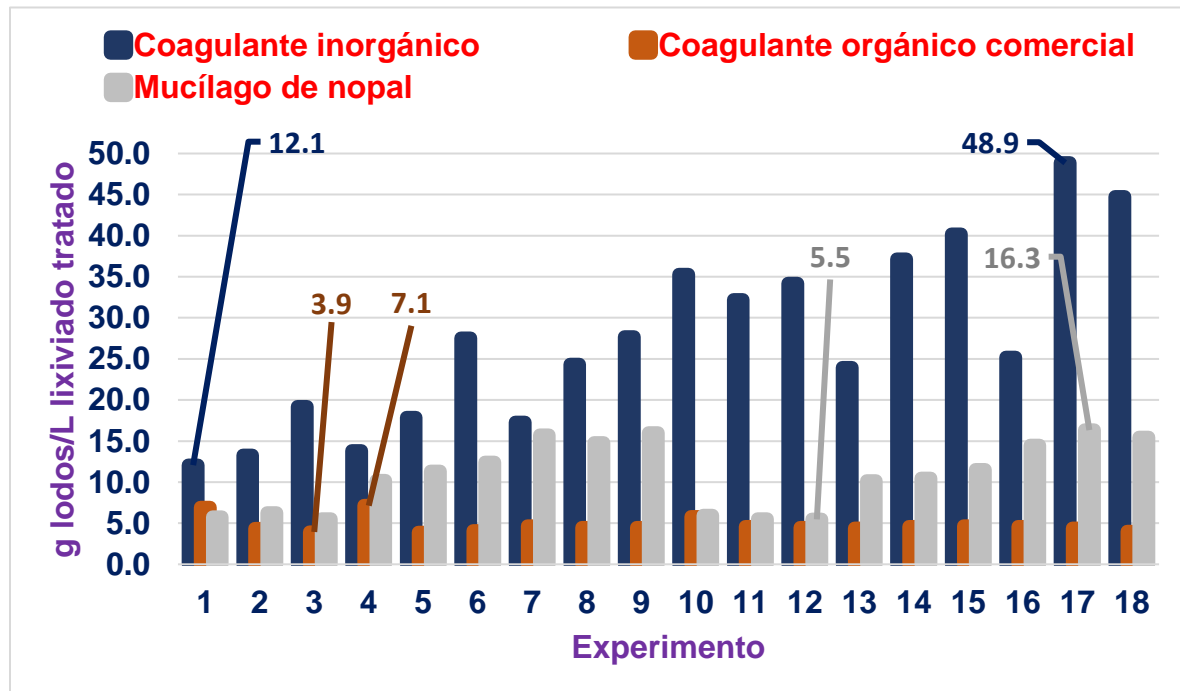


Figura 5.22. Gráfica del comparativo de cantidades de lodos generados en el tratamiento de coagulación-floculación usando tres coagulantes diferentes, base húmeda

En la Figura 5.23 se pueden observar las diferencias visuales entre los lodos generados durante la experimentación. En la imagen **a)** se muestran los lodos generados por el uso de cloruro férrico como coagulante, siendo lodos muy abundantes con una estructura esponjosa. En la imagen **b)** se muestran los lodos generados por el uso del coagulante orgánicos comercial, siendo lodos en menor volumen y con una estructura compacta en pequeñas partículas. En la imagen **c)** se observan los lodos generados por el uso de mucílago de nopal como coagulante, siendo lodos con una consistencia menos esponjosa y compacta.

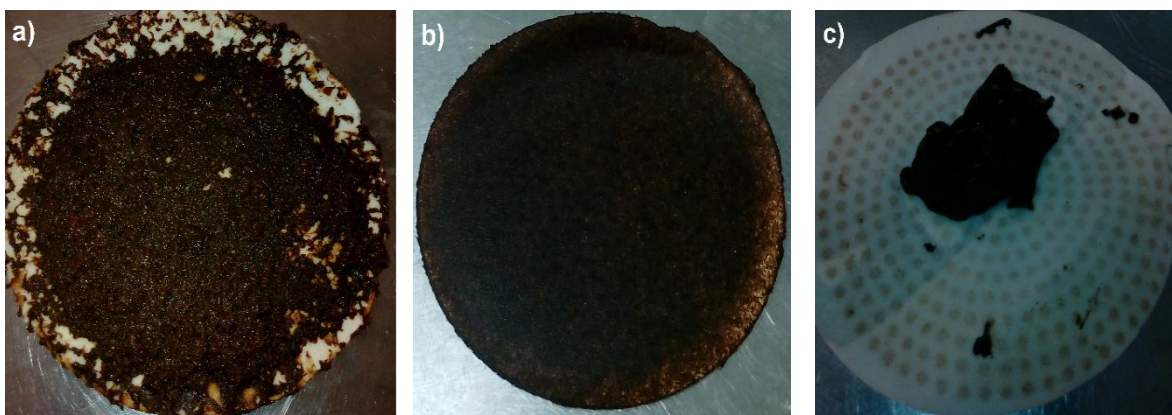


Figura 5.23. Fotografías de lodos generados en el proceso de coagulación-floculación usado tres coagulantes diferentes

5.7.7. pH

En la Figura 5.24 se muestra el comportamiento de la variación de pH en los tratamientos evaluados. Se observó que el tratamiento con cloruro férrico es el que obtuvo lixiviados tratados a un pH más bajo. Al acondicionar los lixiviados a pH de 7.0 la máxima disminución fue a un valor de 6.6, con la máxima dosificación de coagulante de 3.0 g/L. Sin embargo; cuando los lixiviados se acondicionaron a pH de 6.0, se observó una disminución del pH a 2.8. Esto es atribuible al efecto oxidante del cloruro férrico, el cual al hidrolizarse produce iones hidronio, favoreciendo la disminución del pH.

En el caso de los tratamientos con coagulantes orgánicos (comercial y natural) se observó muy poca variación del pH en los lixiviados tratados. Al usar el coagulante comercial con un pH inicial de 8.0 hubo un ligero aumento a 8.3, prácticamente en

todas las dosificaciones. Con el acondicionamiento de lixiviados a pH de 7.0 también se presentó un aumento, con valores de 7.3 a 7.8, dependiendo de la dosificación.

Al usar el mucílago de nopal con bentonita también se presentó una variación del pH. En el experimento 3, a la máxima dosificación de coagulante de 1.0 g/L, el pH aumentó a 7.9. Al acondicionar el pH a 6.0 se modificó el pH a 6.5 con la dosificación máxima de coagulante (experimento 12). Los resultados anteriores confirman las afirmaciones de Carpinteyro (2011) y Hendricks (2006) de que el uso de coagulantes orgánicos modifica en menor medida el pH en comparación al uso de los coagulantes inorgánicos.

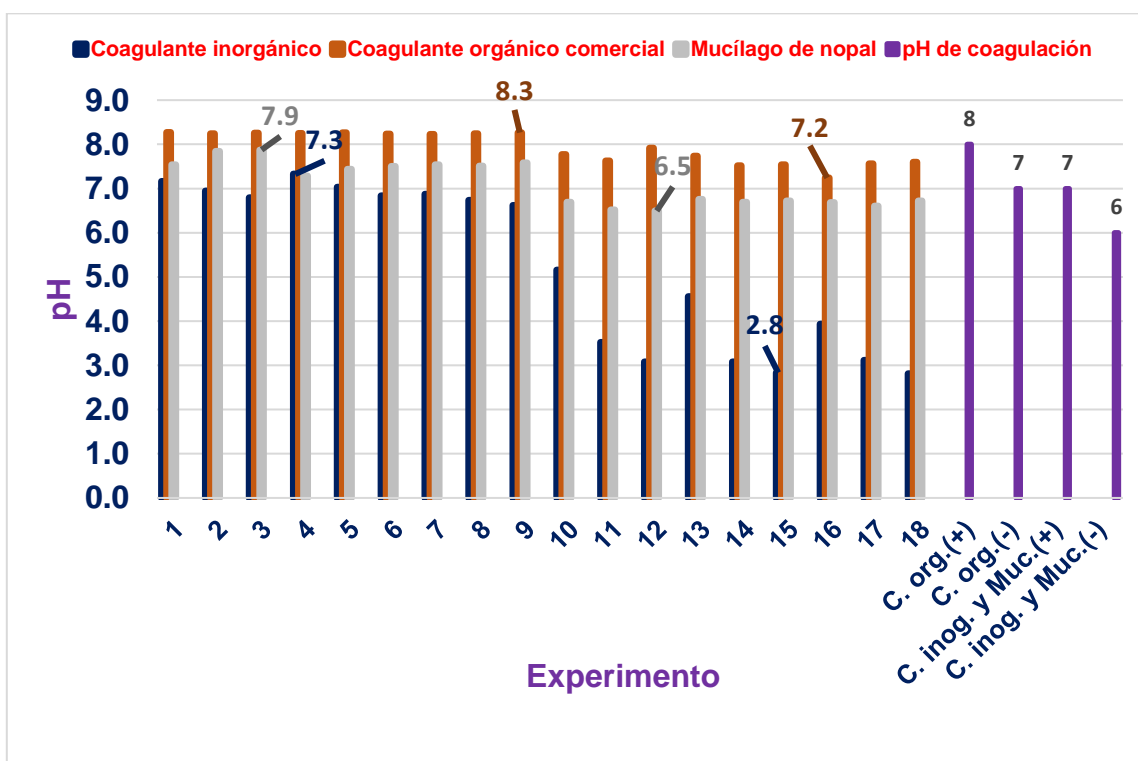


Figura 5.24. Gráfica del comparativo de valores de pH en lixiviados tratados usando tres coagulantes diferentes. **C.inog:** coagulante inorgánico. **C. org:** coagulante orgánico. **Muc:** mucílago. **+**: Valor acondicionado de pH máximo. **-**: Valor acondicionado de pH mínimo

5.7.8. Condiciones óptimas

A las condiciones óptimas determinadas en la Sección 5.5 y señaladas en la Tabla 5.9 de este trabajo de tesis se elaboraron las gráficas mostradas en las Figuras 5.25, 5.26 y 5.27, para los diferentes coagulantes usados

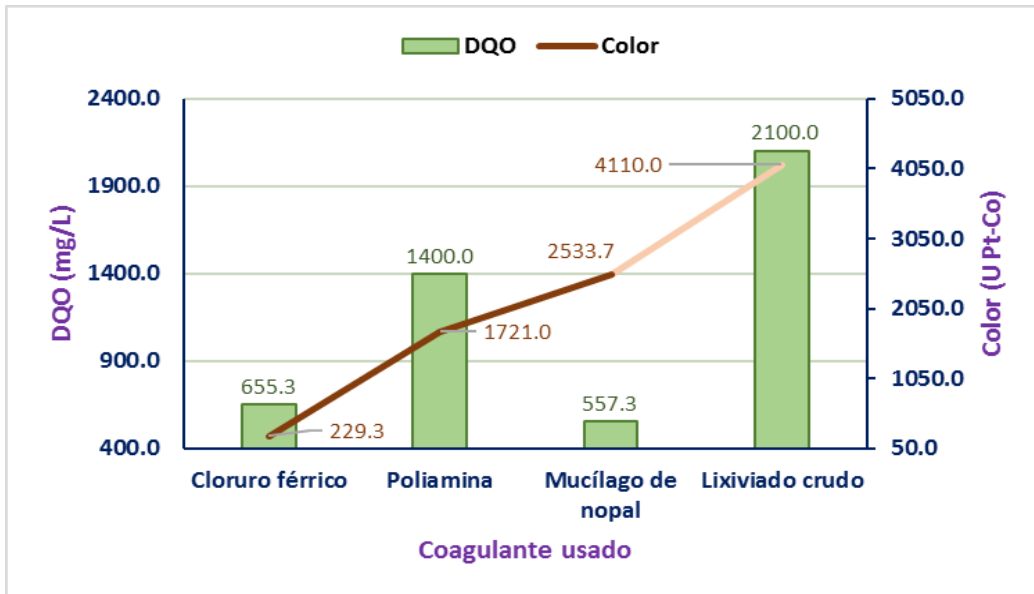


Figura 5.25. Gráfica de los valores obtenidos de DQO y Color en los tres coagulantes usados en las condiciones óptimas. U Pt-Co: Unidades de color platino-cobalto

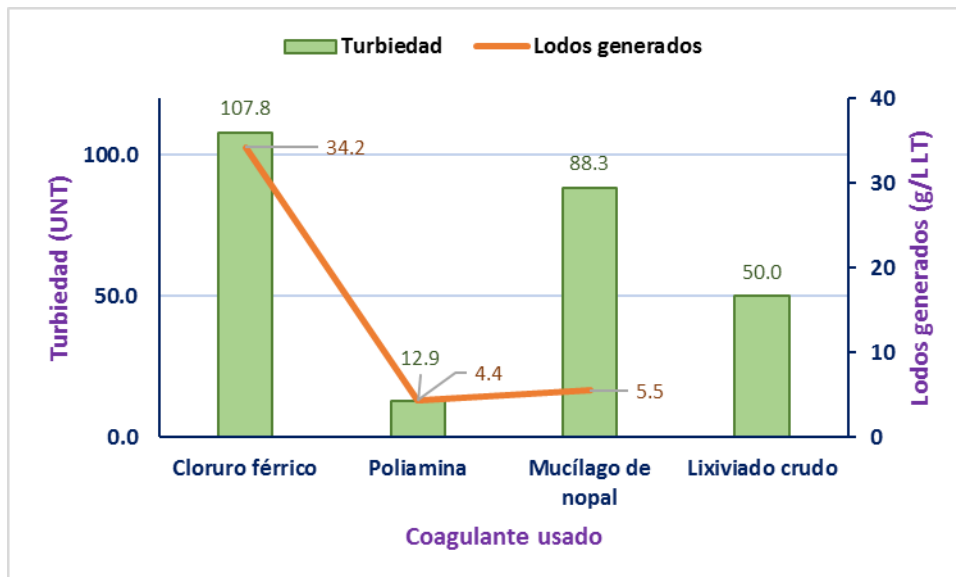


Figura 5.26. Gráfica de los valores obtenidos de Turbiedad y cantidad de lodos generados en los tres coagulantes usados en las condiciones óptimas. LT: Lixiviado tratado

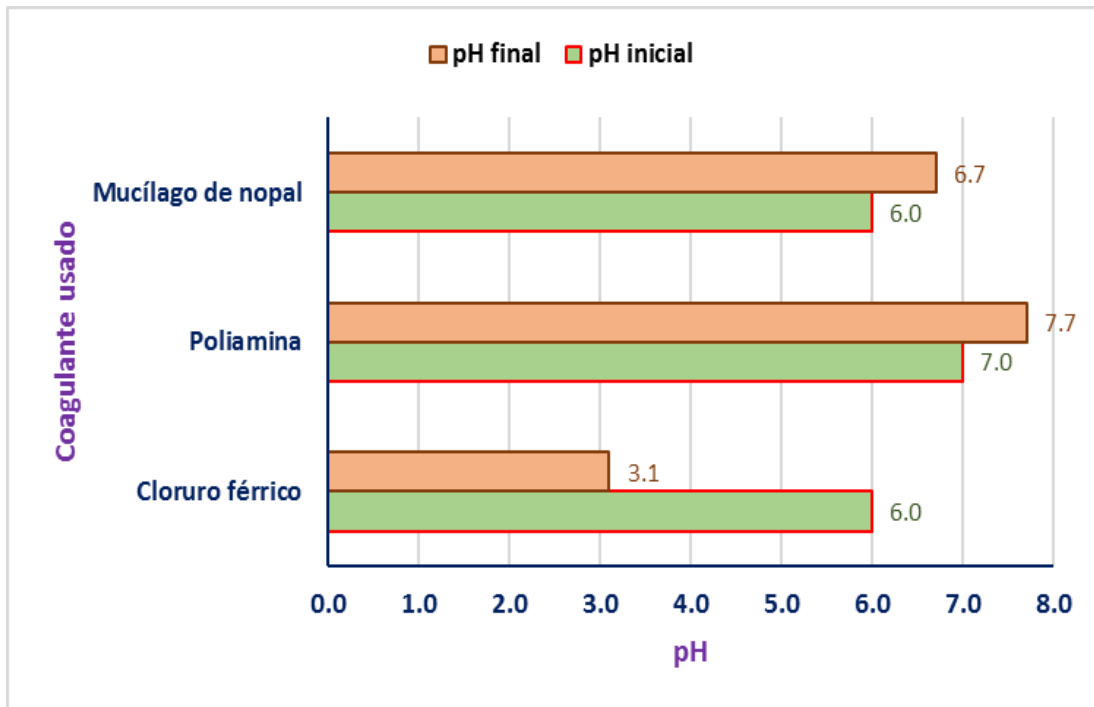


Figura 5.27. Gráfica de los valores obtenidos de pH en los lixiviados, inicial y final, en los tres coagulantes usados en las condiciones óptimas

La discusión de estos resultados ya se realizó en la sección previas de este trabajo de tesis.

5.8.- Matriz de Decisión Multicriterio: Evaluación técnico-económica

Las calificaciones asignadas y los intervalos de costo de los criterios del aspecto económico se muestran en la Tabla 5.11. Los costos consideran el flujo de lixiviados tratados para el volumen actual de la planta de tratamiento de lixiviados del RSBP de 25 m³/día.

Tabla 5.11. Calificaciones asignadas en relación con los Intervalos de costos del aspecto económico de la Matriz de Decisión Multicriterio

Costo de dosis coagulante (USD\$)	Costo de dosis floculante (USD\$)	Costo de la disposición final lodos (USD\$)
<ul style="list-style-type: none"> • 0= 7,151-5,726 • 1= 5,726-4,302 • 2=4,302-2,877 • 3=2,877-1,453 • 4=1,453-28 • 5=28 	<ul style="list-style-type: none"> • 0= 168-135 • 1= 135-102 • 2=102-68 • 3=68-35 • 4=35-2 • 5=2 	<ul style="list-style-type: none"> • 0= 6250-5004 • 1= 5004-3758 • 2=3758-2512 • 3=2512-1266 • 4=1266-20 • 5=20
Costo por consumo de ácido sulfúrico concentrado (USD\$)		Costo por consumo de hidróxido de sodio (USD\$)
<ul style="list-style-type: none"> • 0= 3,057-2,751 • 1= 2,751-2,446 • 2=2,446-2,140 • 3=2,140-1,834 • 4=1,834-1,528 • 5=1,528 		<ul style="list-style-type: none"> • 0= 379-304 • 1= 304-228 • 2=228-152 • 3=152-76 • 4=75-0.0 • 5=0.0

En las Tablas 5.12 y 5.13 se muestran los resultados de la Matriz de Decisión Multicriterio en los aspectos técnico y económico para los mejores resultados de cada etapa de experimentación (se incluyeron las tres mejores de cada etapa). En las Tablas 5.14 y 5.15 se muestran los resultados de la Matriz de Decisión Multicriterio en los aspectos técnico y económico para las condiciones óptimas obtenidas en la sección 5.5 de este trabajo de tesis.

Tabla 5.12 Resultados de la factibilidad técnica por la metodología de Matriz de decisión Multicriterio para las nueve condiciones mejor evaluadas

Coagulante (g/L)	Floculante o bentonita (g/L)	Calificación/ Equivalencia	Remoción DQO	Remoción Turbiedad	Remoción Color	Valor final pH	Tiempo sedimentación floculos	Cantidad lodos generados	Manejabilidad lodos	Requerimiento insumos	Criterio aspecto técnico
			<ul style="list-style-type: none"> • 5= Óptimo (> 70%). • 4= Muy bueno (entre el 50 y 70%). • 3=Bueno (entre el 40 y 50%). • 2=Regular (entre el 30 y 40%). • 1=Malo (< 30%). • 0=Muy malo (No hubo disminución) 	<ul style="list-style-type: none"> • 5= Óptimo (> 70%). • 4= Muy bueno (entre el 50 y 70%). • 3=Bueno (entre el 40 y 50%). • 2=Regular (entre el 30 y 40%). • 1=Malo (< 30%). • 0=Muy malo (No hubo disminución) 	<ul style="list-style-type: none"> • 5= Óptimo (> 70%). • 4= Muy bueno (entre el 50 y 70%). • 3=Bueno (entre el 40 y 50%). • 2=Regular (entre el 30 y 40%). • 1=Malo (< 30%). • 0=Muy malo (No hubo disminución) 	<ul style="list-style-type: none"> • 5= Excelente (pH entre 6 y 8). • 3=Bueno (pH entre 2 y 6; y entre 8 y 12.5). • 0=Malo (cualquier otro valor). 	<ul style="list-style-type: none"> • 5 = Muy rápido (0-3 min). • 3 = Rápido (3-5 min). • 1 = Regular (5-10 min). • 0 = Lento (> 10 min). 	<ul style="list-style-type: none"> • 5= Excelente (valores menores a 20 kg/m³ LT). • 3= Bueno (valores entre 20 a 30 kg/ m³ LT). • 1= Malo (valores mayores a 30 kg/m³ LT). 	<ul style="list-style-type: none"> • 5= Excelente (lodos con capacidad de usarse como composta). • 3= Regular (lodos de con polímero sintético). • 1= Malo (lodos químicos). 	<ul style="list-style-type: none"> • 1= Malo (alto requerimiento de productos químicos). • 3=Regular (Moderado requerimiento de productos químicos). • 5= Excelente (bajo o ningún requerimiento de productos químicos). 	
Mucílago de nopal	Bentonita	A	4.0	0.0	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	37.50
0.5	1.0	A/B	0.100	0.000	0.025	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	
		Cp i	5.00	0.00	1.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	
Mucílago de nopal	Bentonita	A	4.0	0.0	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	37.50
0.75	1.0	A/B	0.100	0.000	0.025	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	
		Cp i	5.00	0.00	1.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	
FL3249	FO 4800SSH	A	2.0	5.0	4.0	5.0	1.0	5.0	3.0	3.0	35.00
0.5	0.025	A/B	0.050	0.125	0.100	0.125	0.025	0.125	0.075	0.075	
		Cp i	2.50	6.25	5.00	6.25	1.25	6.25	3.75	3.75	
Mucílago de nopal	Bentonita	A	4.0	0.0	2.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	38.75
0.5	3.0	A/B	0.100	0.000	0.050	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	
		Cp i	5.00	0.00	2.50	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	
FL3249	FO 4800SSH	A	2.0	3.0	4.0	5.0	1.0	5.0	3.0	3.0	32.50
0.5	0.015	A/B	0.050	0.075	0.100	0.125	0.025	0.125	0.075	0.075	
		Cp i	2.50	3.75	5.00	6.25	1.25	6.25	3.75	3.75	
FL3249	FO 4800SSH	A	2.0	4.0	4.0	5.0	1.0	5.0	3.0	3.0	33.75
0.5	0.035	A/B	0.050	0.100	0.100	0.125	0.025	0.125	0.075	0.075	
		Cp i	2.50	5.00	5.00	6.25	1.25	6.25	3.75	3.75	
Cloruro férrico	FO 4800SSH	A	4.0	5.0	5.0	3.0	5.0	3.0	1.0	1.0	33.75
1.4	0.15	A/B	0.100	0.125	0.125	0.075	0.125	0.075	0.025	0.025	
		Cp i	5.00	6.25	6.25	3.75	6.25	3.75	1.25	1.25	
Cloruro férrico	FO 4800SSH	A	5.0	5.0	5.0	3.0	5.0	1.0	1.0	1.0	32.50
1.4	0.1	A/B	0.125	0.125	0.125	0.075	0.125	0.025	0.025	0.025	
		Cp i	6.25	6.25	6.25	3.75	6.25	1.25	1.25	1.25	
Cloruro férrico	FO 4800SSH	A	4.0	5.0	5.0	3.0	3.0	3.0	1.0	1.0	31.25
1.4	0.2	A/B	0.100	0.125	0.125	0.075	0.075	0.075	0.025	0.025	
		Cp i	5.00	6.25	6.25	3.75	3.75	3.75	1.25	1.25	

pH usando mucílago de nopal: 6.0. pH usando poliamina: 7.0. pH usando cloruro férrico: 6.0. FL3249: Coagulante orgánico comercial, poliamina. FO 4800SSH: Floculante orgánico comercial, poliácridamida. LT: Lixiviado tratado. A: Calificación, A/B = A/ (ni*Amax) = A/(8*5); Cp = A/B*50 (Cp es la calificación ponderada)

Tabla 5.13. Resultados de la factibilidad económica por la metodología de Matriz de Decisión Multicriterio para las nueve condiciones mejor evaluadas

Coagulante (g/L)	Floculante o bentonita (g/L)	Costos	Dosis coagulante (USD\$)	Dosis floculante (USD\$)	Disposición final lodos (USD\$)	Consumo de ácido sulfúrico concentrado (USD\$)	Consumo de hidróxido de sodio (USD\$)	Criterio aspecto económico
		Calificación/ Equivalencia	<ul style="list-style-type: none"> • 0= 7150.57-5726.126 • 1= 5726.126-4301.682 • 2=4301.682-2877.238 • 3=2877.38-1452.794 • 4=1452.794-28.35 • 5=28.35 	<ul style="list-style-type: none"> • 0= 167.85-134.732 • 1= 134.732-101.614 • 2=101.614-68.496 • 3=68.496-35.378 • 4=35.378-2.26 • 5=2.26 	<ul style="list-style-type: none"> • 0= 6250.00-5004.00 • 1= 5004.00-3758.00 • 2=3758.00-2512.00 • 3=2512.00-1266.00 • 4=1266.00-20.00 • 5=20.00 	<ul style="list-style-type: none"> • 0= 3057.14-2751.426 • 1= 2751.426-2445.712 • 2=2445.712-2139.998 • 3=2139.998-1834.284 • 4=1834.284-1528.57 • 5=1528.57 	<ul style="list-style-type: none"> • 0= 379.59-303.672 • 1= 303.672-227.754 • 2=227.754-151.836 • 3=151.836-75.918 • 4=75.918-0.0 • 5=0.0 	
Mucílago de nopal	Bentonita	A	4.0	3.0	5.0	5.0	5.0	44.00
1.0	3.0	A/B	0.16	0.12	0.20	0.20	0.20	
		Cp i	8.0	6.0	10.0	10.0	10.0	
Mucílago de nopal	Bentonita	A	3.0	3.0	5.0	5.0	5.0	42.00
0.75	1.0	A/B	0.12	0.12	0.20	0.20	0.20	
		Cp i	6.0	6.0	10.0	10.0	10.0	
FL3249	FO 4800SSH	A	5.0	4.0	3.0	5.0	5.0	44.00
0.5	0.025	A/B	0.20	0.16	0.12	0.20	0.20	
		Cp i	10.0	8.0	6.0	10.0	10.0	
Mucílago de nopal	FO 4800SSH	A	4.0	1.0	5.0	5.0	5.0	40.00
0.5	3.0	A/B	0.16	0.04	0.20	0.20	0.20	
		Cp i	8.0	2.0	10.0	10.0	10.0	
FL3249	FO 4800SSH	A	5.0	5.0	3.0	5.0	5.0	46.00
0.5	0.015	A/B	0.20	0.20	0.12	0.20	0.20	
		Cp i	10.0	10.0	6.0	10.0	10.0	
FL3249	FO 4800SSH	A	5.0	4.0	3.0	5.0	5.0	44.00
0.5	0.035	A/B	0.20	0.16	0.12	0.20	0.20	
		Cp i	10.0	8.0	6.0	10.0	10.0	
Cloruro férrico	FO 4800SSH	A	2.0	4.0	0.0	0.0	2.0	16.00
1.4	0.15	A/B	0.08	0.16	0.00	0.00	0.08	
		Cp i	4.0	8.0	0.0	0.0	4.0	
Cloruro férrico	FO 4800SSH	A	2.0	4.0	0.0	0.0	2.0	16.00
1.4	0.1	A/B	0.08	0.16	0.00	0.00	0.08	
		Cp i	4.0	8.0	0.0	0.0	4.0	
Cloruro férrico	FO 4800SSH	A	2.0	4.0	0.0	0.0	1.0	14.00
1.4	0.2	A/B	0.08	0.16	0.00	0.00	0.04	
		Cp i	4.0	8.0	0.0	0.0	2.0	

pH usando mucílago de nopal: 6.0. pH usando poliamina: 7.0. pH usando cloruro férrico: 6.0. **FO 4800SSH:** Floculante orgánico comercial, poliacrilamida. **USD\$:** Dólar estadounidense. Costos calculados para tratar 25 metros cúbicos de lixiviados. A/B = A/ (ni*Amáx) = A/(5*5); Cp = A/B*50 (Cp es la calificación ponderada)

Tabla 5.14 Resultados de la factibilidad técnica por la metodología de Matriz de decisión Multicriterio para las condiciones optimas de los coagulantes evaluados

Coagulante (g/L)	Floculante o bentonita (g/L)	Calificación/ Equivalencia	Remoción DQO	Remoción Turbiedad	Remoción Color	Valor final pH	Tiempo sedimentación floculos	Cantidad lodos generados	Manejabilidad lodos	Requerimiento insumos	Criterio aspecto técnico
			<ul style="list-style-type: none"> 5= Óptimo (> 70%). 4= Muy bueno (entre el 50 y 70%). 3=Bueno (entre el 40 y 50%). 2=Regular (entre el 30 y 40%). 1=Malo (< 30%). 0=Muy malo (No hubo disminución) 	<ul style="list-style-type: none"> 5= Óptimo (> 70%). 4= Muy bueno (entre el 50 y 70%). 3=Bueno (entre el 40 y 50%). 2=Regular (entre el 30 y 40%). 1=Malo (< 30%). 0=Muy malo (No hubo disminución) 	<ul style="list-style-type: none"> 5= Óptimo (> 70%). 4= Muy bueno (entre el 50 y 70%). 3=Bueno (entre el 40 y 50%). 2=Regular (entre el 30 y 40%). 1=Malo (< 30%). 0=Muy malo (No hubo disminución) 	<ul style="list-style-type: none"> 5= Excelente (pH entre 6 y 8). 3= Bueno (pH entre 2 y 6; y entre 8 y 12.5). 0=Malo (cualquier otro valor). 	<ul style="list-style-type: none"> 5= Muy rápido (0-3 min). 3= Rápido (3-5 min). 1= Regular (5-10 min). 0= Lento (> 10 min). 	<ul style="list-style-type: none"> 5= Excelente (valores menores a 20 kg/m³ LT). 3= Bueno (valores entre 20 a 30 kg/ m³ LT). 1= Malo (valores mayores a 30 kg/m³ LT). 	<ul style="list-style-type: none"> 5= Excelente (lodos con capacidad de usarse como composta). 3= Regular (lodos de con polímero sintético). 1= Malo (lodos químicos). 	<ul style="list-style-type: none"> 1= Malo (alto requerimiento de productos químicos). 3=Regular (Moderado requerimiento de productos químicos). 5= Excelente (bajo o ningún requerimiento de productos químicos). 	
Mucílago de nopal	Bentonita	A	4.0	0.0	2.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	38.75
1.0	3.0	A/B	0.100	0.000	0.050	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	
		Cp i	5.00	0.00	2.50	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	
FL3249	FO 4800SSH	A	2.0	5.0	4.0	5.0	1.0	5.0	3.0	3.0	35.00
0.5	0.023	A/B	0.050	0.125	0.100	0.125	0.025	0.125	0.075	0.075	
		Cp i	2.50	6.25	5.00	6.25	1.25	6.25	3.75	3.75	
Cloruro férrico	FO 4800SSH	A	5.0	5.0	5.0	3.0	5.0	1.0	1.0	1.0	32.50
3.0	0.1	A/B	0.125	0.125	0.125	0.075	0.125	0.025	0.025	0.025	
		Cp i	6.25	6.25	6.25	3.75	6.25	1.25	1.25	1.25	

pH usando mucílago de nopal: 6.0. pH usando poliamina: 7.0. pH usando cloruro férrico: 6.0. FL3249: Coagulante orgánico comercial, poliamina. FO 4800SSH: Floculante orgánico comercial, poliácilamida. LT: Lixiviado tratado. A: Calificación, A/B = A/ (ni*Amax) = A/(8*5); Cp = A/B*50 (Cp es la calificación ponderada)

Tabla 5.15 Resultados de la factibilidad económica por la metodología de Matriz de decisión Multicriterio para las condiciones optimas de los coagulantes evaluados

Coagulante (g/L)	Floculante o bentonita (g/L)	Costos	Dosis coagulante (USD\$)	Dosis floculante (USD\$)	Disposición final lodos (USD\$)	Consumo de ácido sulfúrico concentrado (USD\$)	Consumo de hidróxido de sodio (USD\$)	Subtotal
Mucílago de nopal	Bentonita	A	4	3	5	5	5	44.00
1	3	A/B	0.16	0.12	0.20	0.20	0.2	
		Cp i	8.00	6.00	10.00	10.00	10	
FL3249	FO 4800SSH	A	5	4	3	5	5	44.00
0.5	0.023	A/B	0.20	0.16	0.12	0.20	0.2	
		Cp i	10.00	8.00	6.00	10.00	10	
Cloruro férrico	FO 4800SSH	A	2	4	0	0	2	16.00
3	0.1	A/B	0.08	0.16	0.00	0.00	0.08	
		Cp i	4.00	8.00	0.00	0.00	4	

pH usando mucílago de nopal: 6.0. pH usando poliamina: 7.0. pH usando cloruro férrico: 6.0. FO 4800SSH: Floculante orgánico comercial, poliácilamida. USD\$: Dólar estadounidense. Costos calculados para tratar 25 metros cubicos de lixivados. A/B = A/ (ni*Amax) = A/(5*5); Cp = A/B*50 (Cp es la calificación ponderada)

En la Tabla 5.16 se muestra la suma de los criterios, técnico y económico, en una escala que va de 0 a 100, para las condiciones óptimas.

Tabla 5.16. Resultados totales de la Matriz de Decisión Multicriterio para las condiciones óptimas en las tres etapas de experimentación

Condiciones			Evaluación técnico-económica		
pH	Coagulante (g/L)	Floculante (g/L)	Criterio aspecto económico	Criterio aspecto técnico	Total
6	Mucílago de nopal	Bentonita	44.0	38.8	82.8
	1.0	3.0			
7	FL3249	FO 4800SSH	44.0	35.0	79.0
	0.5	0.023			
6	Cloruro férrico	FO 4800SSH	16.0	32.5	78.5
	3.0	0.1			

Se observó que la opción mejor evaluada fue usando mucílago de nopal con bentonita, seguida del uso de poliamida y finalmente el cloruro férrico. Las razones por la que el cloruro férrico fue mal evaluado en el criterio económico son los altos costos de reactivos, en comparación al mucílago de nopal y; además, el costo de disposición final de lodos, debido a la mayor cantidad de lodos generados.

6.- CONCLUSIONES

- La hipótesis planteada en este trabajo de tesis es aceptada, estableciéndose que el uso del mucílago de *Opuntia ficus-indica* en el proceso de coagulación-floculación, es una medida técnica y económica viable, aplicable al tratamiento de lixiviados maduros provenientes de la etapa III del RSBP.
- Los tres procedimientos evaluados de extracción de mucílago de nopal, en relación con la cantidad de mucílago obtenido, no resultaron ser significativamente diferentes entre sí.
- La extracción de mucílago de nopal por el procedimiento de escaldado, en relación con el contenido de carbohidratos, resultó ser significativamente diferente en comparación a los otros dos métodos evaluados, obteniéndose a través de este procedimiento el mayor porcentaje de carbohidratos.
- Se determinaron las dosis óptimas de coagulante, floculante y pH en cada etapa de experimentación. En la primera etapa las dosis óptimas fueron de 3.0 y 0.1 g/L de cloruro férrico y poliacrilamida, respectivamente, a un pH de 6.0 para una remoción máxima de DQO de 68.5%. En la segunda etapa de experimentación las dosis óptimas fueron de 0.5 g/L y 0.023 g/L de poliamina y poliacrilamida, respectivamente, a un pH de 7.0 para una remoción máxima de DQO de 39.3%. En la tercera etapa de experimentación las dosis óptimas fueron de 1.0 g/L y 3.0 g/L de mucílago y bentonita, respectivamente, a un pH de 6.0 para una remoción máxima de DQO de 70.3%.
- En relación con los factores evaluados en las pruebas de jarras:
 - La dosis del coagulante tuvo una influencia significativa en el porcentaje de remoción de DQO. En el caso del uso de cloruro férrico y la poliamina fue una influencia directa y en el caso del mucílago de nopal fue una influencia de interacción con la bentonita.

- El pH tuvo una mayor influencia en la remoción de DQO en el caso del uso del cloruro férrico, ya que el caso de los polímeros orgánicos (poliamina y mucílago de nopal) prácticamente no tuvo dependencia.
- La dosis del floculante no tuvo un efecto significativo en la remoción de DQO en el caso del uso del cloruro férrico y la poliamina. En el caso del mucílago de nopal la dosis de la bentonita tuvo una influencia directa en la remoción de DQO, además de influencias de interacción con el pH y la dosis del coagulante.
- A condiciones óptimas, el uso de cloruro férrico fue la alternativa que generó mayor cantidad de lodos, seis veces más que el mucílago de nopal y siete veces más que la poliamina.
- La condición de reactivos óptima que obtuvo la calificación más alta en la Matriz de Decisión Multicriterio fue la alternativa desarrollada en la etapa III de experimentación -usando mucílago de nopal con bentonita-.
- La alternativa de uso de nopal desarrollada en la presente investigación es una opción de valorización de las pencas de nopal que, en la mayoría de los casos, los productores las consideran un desperdicio, debido a su gran grosor, lo que las hace poco comerciales.

7.- RECOMENDACIONES

- Se propone el desarrollo de futuras investigaciones que evalúen el reúso de los lodos generados. Es necesario realizar investigaciones que caractericen a los lodos producidos y poder así evaluar su reúso en composta, como agregado al material de cubierta del relleno sanitarios o bien como material de construcción.
- Es necesario que México considere una normativa específica a lixiviados, debido a su alta toxicidad, considerándose los estándares de descarga que ya existen en otros países. Se propone la realización de estudios que evalúen los impactos ambientales causadas por la mala gestión de los lixiviados en México, para hacerlos llegar a los tomadores de decisiones y puedan de esta forma considerar una normativa en esta área.

8.- REFERENCIAS

- Abraján, V. M. (2008). Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral. doi:10.4995/Thesis/10251/3794
- Alcantar, R. F. (2015). Evolución de las Características Físico-Químicas del Lixiviado Generado en el Relleno Sanitario Bordo Poniente. México D.F: Tesis de Licenciatura UNAM.
- Amokrane, A., Comel, C. y Verón, J. (1997). Landfill Leachates Pretreatment by Coagulation-Flocculation. *Water Research*, 31(11), 2775-2782.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de Agua. Coagulación-Floculación, 12-44. Consultado el 11 de octubre de 2016, de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154
- Andrés, P. y Rodríguez, R. (2008). Gestión y Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos. *Documenta Universitaria*, 215-220.
- AOAC. (1990). Métodos Oficiales de Análisis. Asociación de Químicos Analíticos Oficiales (Association of Official Analytical Chemists). (K. Helrich, Ed.) Arlington, Virginia.
- APHA. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Waters*. Washington, USA: American Public Health Association.
- Aquino, E. (2015). Reciclaje de residuos de la construcción para la fabricación de ladrillos sustentables. Tesis UNAM, 59. Consultado el 11 de octubre de 2016, de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/8216>
- Asrafuzzaman, M. D., Fakhuruddin, A. N. y Alagar, M. D. (2011). Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants. *Int. Scholarty Res. Network ISRN Microbiology*, 1(12), 6. doi:10.5402/2011/632189
- ASTM. (2003). ASTM D2035-08. Standard Practices for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water. Estados Unidos de Norteamérica.
- AWWA. (1990). *Water Quality and Treatment* (Cuarta ed.). Estados Unidos de Norteamérica: McGraw-Hill.
- AWWA. (2000). *Manual M37. Operational Control of Coagulation and Filtration Processes* (Segunda ed.). Estados Unidos de Norteamérica.
- Aziz, H. A., Alias, S., Faridah, A., Adlan, M. N., Zahari, M. S. y Assari, A. H. (2007). Colour Renovar from Landfill Leachate by Coagulation and Flocculation Processes. *Bioresour Technology*, 98(1), 218-238.
- Bhalla, B., Saini, M. S. y Jha, M. K. (2012). Characterization of leachate from Municipal Solid Waste (MSW) Landfilling sites of Ludhiana, India: A Comparative Trudy. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(6), 732-745. Obtenido de <http://admin.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/Landfilling%20Sites%20of%20Ludhiana.pdf>
- Bolto, B. y Gregory, J. (2007). Organic Polyelectrolytes in Water Treatment. *Water Research*, 41(11), 2301-2324. doi: 10.1016/j.watres.2007.03.012
- Bratby, J. (2006). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. Inglaterra: IWA Publishing.
- Bravo. (1978). *Las Cactáceas en México*. Tomo 1. México, D.F., México: UNAM.

- Cárdenas, A., Balderrama, J., Hernández, G. y Goycoolea, F. (1999). Biopolímeros de alto valor de plantas nativas del desierto. Memorias del Simposium Internacional sobre la Utilización y Aprovechamiento de la Flora Silvestre en Zonas Áridas, La Serena, Chile, 254-259.
- Cárdenas, Goycoolea y Rinauto. (2008). On The Gallina Behaviour of Nopal (*Opuntia ficus-indica*) Low Methoxyl Pectan. Carbohydrate Polymers (73), 212-222. doi: 10.1016/j.carbpol.2007.11.017
- Cárdenas, Higuera-Ciapara y Goycoolea. (1998). Rheology and Aggregation of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Mucilage in Solution. J. Profess, Asocc. Cactus Develop (2), 152-159. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Goycoolea/publication/242096813_Rheology_and_Aggregation_of_Cactus_Opuntia_ficus-indica_Mucilage_in_Solution/links/54aaa8330cf2bce6aa1d53ed/Rheology-and-Aggregation-of-Cactus-Opuntia-ficus-indica-Mucilage-in-
- Carpinteyro, S. L. (2011). Tratamiento de aguas residuales empleando polímeros naturales y biodegradabilidad de lodos generados. En Tesis de Maestría. Ciudad de México, UPIBI, IPN, 4-9. Obtenido de <http://tesis.bnct.ipn.mx/handle/123456789/19805>
- Castellanos, M. C., Becerra, N. P., Carreño, L. y Páez, L. P. (2012). Estudio comparativo de la acción coagulante-floculante del mucílago de *Opuntia ficus indica* por los métodos: coagulación y electrocoagulación en los lixiviados del Relleno Sanitario Pirgua de Tunja. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, 5(1), 44-55. Obtenido de <http://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/05>
- Cerón, O. (2016). Procesos de coagulación-floculación-adsorción para la remoción de materia orgánica disuelta responsable del ensuciamiento irreversible de membranas de microfiltración. UNAM, Tesis de Grado, Doctorado en Ingeniería. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/10449>
- CESOP. (2012). Residuos Sólidos Urbanos en México. Reportes Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública CESOP. Cámara de Diputados, LXI Legislatura (51), 1-40.
- Chen, Y., Dong, B., Gao, N. y Fan, J. (2007). Effect of Coagulation Pretreatment on the Fouling of Ultrafiltration Membrane. Desalination (204), 181-188.
- Chow, C., Fabris, R., Van Leeuwen, J., Wang, D. y Drikas. (2008). Assessing Natural Organic Matter Treatability Using High Performance Size Exclusion Chromatography. Environ. Sci. Technology, 42(17), 6683-6689. Obtenido de <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es800794r>
- Chow, K. W., Rumsey, G. L. y Woldroup, P. W. (1980). Linear Programming in Fish Diet Formulation. Fish Feed Technology, 80(11), 395.
- Cobos, M., Costa, M., Castro, J. y Adrianzén, P. (2012). Efecto Genotóxico del Lixiviado de Rellenos Sanitarios. Reunión del ICBAR (pág. 67). Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- De la Rosa y Santana. (2001). El nopal: Usos, Manejo Agronómico y Costes de Producción en México. CONAZA-UACH-CIESTAAM, 23-35.
- De Wolfe, J., Dempsey, B., Taylor, M. y Potter, J. (2003). Guidance Manual for Coagulation Changeover. AWWA Research Foundation. Obtenido de <http://www.waterrf.org/Pages/Projects.aspx?PID=2512>
- DGN. (1980). SCFI. Dirección General de Normas. Norma Mexicana NMX-AA-003-1980. Aguas Residuales: Muestreo. 1-8.
- Diputados LXII Legislatura. (2015a). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Última reforma publicada DOF 10 de julio de 2015. 6.

- Diputados LXII Legislatura. (2015b). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Última reforma 22 de mayo de 2015. 5-6.
- DOF. (1980). Diario Oficial de la Federación, 11 de julio de 1980. Norma Mexicana NMX-AA-017-1980. Aguas. Determinación de Color. CCCLXI, 8-10.
- DOF. (1993). NOM-053-SEMARNAT-1993. Procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar la movilidad de los constituyentes de un residuo, que lo hacen peligroso por su toxicidad al ambiente. 1-23.
- DOF. (1997). Diario Oficial de la Federación, 6 de enero de 1997. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. DXX, 68-81.
- DOF. (1998a). Diario Oficial de la Federación, 3 de junio de 1998. NOM-002-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes a las descargas de agua residual a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. DXXXVII, 7-14.
- DOF. (1998b). Diario Oficial de la Federación, 21 de septiembre de 1998. NOM-003-SEMARNAT-1997. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al público. DXL, 17-21.
- DOF. (2001a). Norma Oficial Mexicana, 1 de agosto de 2001. Norma Mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de turbiedad. DLXXV, 29.
- DOF. (2001b). Diario Oficial de la Federación, 17 de abril de 2001. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua -determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. DLXXI, 44.
- DOF. (2004). NOM-083-SEMARNAT-2003. Norma Oficial Mexicana. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos. DCXIII, 6-19.
- DOF. (2006). Diario Oficial de la Federación, 23 de junio de 2006. Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Características, procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. DCXXXIII, 3-10.
- DOF. (2011). Diario Oficial de la Federación, 5 de octubre de 2011. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI. Análisis de Agua. Determinación de pH. DCXCVII, 54-55.
- DOF. (2013). Diario Oficial de la Federación, 21 de mayo de 2013. Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2012. Análisis de Agua. Determinación de Demanda Química de Oxígeno. DCCXVI, 47-48.
- FAO. (2012). Manual de Técnicas para Laboratorio de Nutrición. Departamento de Pesca. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Consultado el 12 de septiembre de 2016, de <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab489s/ab489s03.htm>
- FCAUNAM. (2002). Facultad de Contaduría y Administración, Coordinación de Matemáticas, Estadística II. Consultado el 12 de noviembre de 2016, de http://fcasua.contad.unam.mx/apuntes/interiores/docs/98/4/estadis_2.pdf
- Figueroa, J. J., Domínguez, V. S., Zegbe, J., Alvarado, M. D. y Mena, J. (2011). Extracción y Purificación de Mucílago de Nopal. INIFAP, SAGARPA, 1-3.
- Forni, Penci y Polerello. (1994). A Preliminary Characterization of Some Pectins from *Opuntia ficus-indica*. Carbohydrate Polimers (23), 231-234.

- Gibson, A. y Nobel, P. (1986). *The Captus Primer*. Londres, Inglaterra: Harvard University Press.
- Goirdani, S., González, L., Morales, A., Quijano, J. y Tejada, A. (2008). Factibilidad del Uso de Polímeros para la Clarificación del Agua Potable en la Ciudad de Mérida. *Creando. Revista Científica*, 7, 97-108.
- González, Y., Marcano, N., Mendoza, I. y Fuentes, L. (2009). Efectividad de una Suspensión de *Opuntia ficus-indica* en la Clarificación de Aguas Sintéticas con alta turbidez. *Impacto Científico*, 4(2), 361-374.
- Gou, X., Li, Q., Hu, W., Gao, W. y Liu, D. (2009). Ultrafiltration of Dissolved Organic Matter in Surface Water by a Polyvinylchloride Hollow Fiber Membrane. *J. Memb. Sci.* (327), 254-263. doi: 10.1016/j.memsci.2008.11.042
- Goycoolea, F. M. y Cárdenas, A. (2003). Pectins from *Opuntia spp.*: A Short Review. *Journal of the Professional Association for Cactus Development JPACD*, 2, 152-159. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Goycoolea/publication/228769966_Pectins_from_Opuntia_spp_A_short_review/links/0fcfd50eb1465c55b1000000/Pectins-from-Opuntia-spp-A-short-review.pdf
- Gray, D., Pollard, S., Spence, L., Smith, J. y Grown, J. (2005). Spray Irrigation of Landfill leachate: Estimating Potential Exposures to Workers and Bystanders using a Modified Air Box Model and Generalized Source Term. *Environmental Pollution* (133), 587-599. doi: 10.1016/j.envpol.2004.06.010
- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos (Segunda ed.)*. D.F: McGraw-Hill.
- Habibi, Heyraud, Matroz y Dignen. (2004). Structural Features of pectina Polysaccharides from the Skin of *Opuntia ficus-indica* Prickly Pear Fruits. *Carbohydrate Research* (60), 1119-1127. doi: 10.1016/j.carres.2004.02.005
- HACH. (2000). *Manual de Análisis de Agua. Procedimientos fotométricos, procedimientos de titulación y procedimientos microbiológicos (Segunda edición en español ed.)*. Loveland, Colorado, Estados Unidos de Norteamérica. Obtenido de www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639984469
- HACH. (2013a). *User Manual. BOD Trak II*. Loveland, Colorado, Estados Unidos de Norteamérica. Obtenido de www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=7639982401
- HACH. (2013b). *Manual de Usuario. Turbidímetros 2100Q y 2100Qis*. Loveland, Colorado, Estados Unidos de Norteamérica. Obtenido de <http://latam.hach.com/turbidimetro-portatil-2100q/product-downloads?id=16076547542>
- Heger, K. U. y Stegmann, R. (2015). *Leachate Management: Leachate Generation, Collection, Treatment and Cost*. Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, 1-3. Consultado el 12 de octubre de 2015, de <http://www.ifas-hamburg.de/pdf/leachate.pdf>
- Hendricks, D. (2006). *Water Treatment Unit Processes: Physical and Chemical*. New York, Estados Unidos de Norteamérica: Taylor and Francis Group. Obtenido de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=ETtRC-yJtRsC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Water+Treatment+Unit+Processes:+Physical+and+Chemical&ots=zkVfeJhMV&sig=IPpjtWZ2W4dM0qm_Bottq- iq7KI&redir_esc=y#v=onepage&q=Water%20Treatment%20Unit%20Processes%3A%20Physical%20
- Herbert, A. y Walter, E. (1982). *Análisis Químico. Texto Avanzado de Referencia*. Barcelona: Reverte.

- INECC. (1994). Nopal Verdura: Cultivo Alternativo para las Zonas Áridas y Semiáridas en México. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, 1-5.
- INECC. (2007). EL Nopal en México. Consultado el 17 de octubre de 2015, de Instituto Nacional de Ecología: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/71/nverdura.html>
- INEGI. (2010). Información Estadística. Rellenos Sanitarios por Entidad Federativa. Consultado el 1 de diciembre de 2015, de <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=est&c=6116&e=&i=>
- Johannessen, L. M. (1999). Guidance Note on Leachate Management for Municipal Solid Waste Landfills. The World Bank, 1-4.
- Kíss, G. y Encarnación, G. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de los residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. Gaceta Ecológica, Instituto Nacional de Ecología, abril 2006(79), 39-40. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2877246.pdf>
- Kurniawan, T., Lo, W. H. y Chan, G. Y. (2006). Physico-Chemical Treatments for Removal of Recalcitrant Contaminants from Landfill Leachate. Journal of Hazardous Materials, 129(3), 80-100. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.08.010
- Lainés, J., Goñi, J., Adams, R. y Camacho, W. (2008). Mezclas con Potencial Coagulante para Tratamiento de Lixiviados de un Relleno Sanitario. Interciencia, 22-28. Obtenido de http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:20b_qHi7NLkKJ:www.scielo.org/ve/scielo.php%3Fscript%3Dsci_arttext%26pid%3DS0378-18442008000100006&num=1&hl=es-419&gl=mx&strip=1&vwsr=0
- Lee, D. (2014). Un vistazo a la tecnología de coagulación-floculación. Consultado el 11 de octubre de 2016, de http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/V14_N4_Agua_Wilson.pdf
- López, E. (2000). Utilización de Productos Naturales en la Clarificación de Agua para Consumo Humano. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería Química. ISPJAE. Universidad de la Habana, Cuba.
- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del Arte del Tratamiento de Aguas por Coagulación-Floculación. Instituto Cubano de Investigaciones, 40(2), 10-17. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>
- Lozano-Rivas, W. A. (2012). Uso de Extracto de Figue (*Furcraea sp.*) como Coadyuvante de Coagulación en Tratamientos de Lixiviados. Revista Internacional Contaminación Ambiental, 28(3), 219-227. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300004
- Luna, Y., Otal, E., Vilches, L., Vale, J. y Querol, X. (2007). Use of Zeolotised Coal Fly Ash for Landfill Leachate Treatment: A Pilot Plant Study. Waste Management, 27(12), 1877-1883. doi: 10.1016/j.wasman.2006.10.016
- Majdoub, Roudesli y Deratani. (2001a). Polysaccharides from Prickly Pear Peel and Nopals of *Opuntia ficus-indica*: Extraction, Characterization and Behaviour. Polimer International (50), 552-560. doi: 10.1002/pi.665
- Majdoub, Roudesli, Picton, Le Cerf, Muller y Grisel. (2001b). Prickly Pear Nopal Pectin from *Opuntia ficus-indica*, Physico-Chemical Study in Dilute Solutions. Carbohydrate Polymers (46), 69-79. doi:10.1016/S0144-8617(00)00284-8
- Manahan, S. E. (2013). Introducción a la Química Ambiental. México DF: Reverté.
- Márquez, E. (1994). Uso de Floculantes Nacionales en la Potabilización de Aguas Superficiales. Revista Ingeniería Hidráulica, 15(2), 11-15. Obtenido de <http://biblat.unam.mx/es/revista/ingenieria-hidraulica-la-habana/articulo/uso-de-floculantes-nacionales-en-la-potabilizacion-de-aguas-superficiales>

- Massoagro. (2012). Introducción a la Química de las Sustancias Húmicas. Madrid, España: Masso. Obtenido de www.massagro.com/es/component/attachments/download/8
- Matilainen, A., Gjessing, E., Lahtinen, T., Hed, L., Bhatnagar, A. y Sillanpää, M. (2011). An Overview of the Methods Used in the Characterization of Natural Organic Matter (NOM) in Relation to Drinking Water Treatment. *Chemosphere* (83), 1431-1442. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.01.018
- McEwen, J. (1997). Treatment Process Selection for Particle Removal (Primera ed.). Denver, Estados Unidos de Norteamérica: AWWA. Obtenido de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=dtx2WnoOS-0C&oi=fnd&pg=PP11&dq=Treatment+Process+Selection+for+Particle+Removal&ots=9CzNHXQILX&sig=CqN_ZTaXkeR1J1c808Xad8mfCPE&redir_esc=y#v=onepage&q=Treatment%20Process%20Selection%20for%20Particle%20Remova
- McGarvie y Parolis. (1979a). The Mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Research* (69), 171-179. doi:10.1016/S0008-6215(00)85762-6
- McGarvie y Parolis. (1979b). The Mucilage of *Opuntia ficus-indica*. Part 2. The Degraded Polysaccharide. *J. Chem. Soc., Perkin Trans I*. doi: 10.1039/P19790001464
- McGarvie y Parolis. (1981). The Acid-Labile, Peripheral Chains of the Mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Research*, 94(1), 57-65. doi:10.1016/S0008-6215(00)85595-0
- Medina-Torres, Brito de la Fuente, Torrestiana-Sánchez y Alonso. (2003). Mechanical Properties of Gel Formed by Mixtures of Mucilage Gum (*Opuntia ficus-indica*) and Carrageenans. *Carbohydrate Polymers*, 52(2), 143-150. doi: 10.1016/S0144-8617(02)00269-2
- Medina-Torres, Brito de la Fuente, Torrestiana-Sánchez y Katthain. (2000). Rheological Properties of the Mucilage Gum (*Opuntia ficus-indica*). *Food Hydrocolloids*, 14(5), 417-424. doi: 10.1016/S0268-005X(00)00015-1
- Méndez, R., Castillo, E., Sauri, M. R., Quintal, C., Giocoman, G. y Jiménez, B. (2004). Tratamiento Físico-Químico de los Lixiviados de un Relleno Sanitario. *Ingeniería Revista Académica*, 8(2), 155-163. Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/467/46780213/>
- Metcalf y Eddy. (1996). *Ingeniería de Aguas Residuales*. Tomo I. México: McGraw-Hill.
- Miller, S. M., Furgate, E. J., Oyanedel, C. V., Smith, J. A. y Zimmerman, J. B. (2008). Towards Understanding the Efficacy and Mechanism of *Opuntia spp.* as a Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment. *Environmental Science and Technology*, 42(12), 4274-4279. doi:10.1021/es7025054
- Miretzky, P., Muñoz, C. y Carrillo-Chávez, A. (2008). Experimental Binding of Lead to a Low Cost on Biosorbent: Nopal (*Opuntia streptacantha*). *Bioresource Technology*, 99(5), 1211-1217. doi: 10.1016/j.biortech.2007.02.045
- Montgomery, J. (1985). *Water Treatment Principles and Design*. Estados Unidos de Norteamérica: John Wiley and Sons.
- Morán, L. (febrero de 2013). Fundación UNAM. El nopal, orgullosamente mexicano. Consultado el 17 de octubre de 2015, de <http://www.fundacionunam.org.mx/salud/el-nopal-orgullosamente-mexicano/>
- Morel, J., Mench, M. y Guecket, A. (1986). Measurement of Pb²⁺, Cu²⁺, and Cd²⁺ Binding with Mucilage Exudates from Maize (*Zea mays L.*) Roots. *Biol. Fert. Soils*, 2(1), 29-34. doi:10.1007/BF00638958

- Nájera, H. A., Castañón, J., Figueroa, J. y Rojas-Valencia, M. N. (2009). Caracterización y Tratamiento Físico-Químico de Lixiviados Maduros Producidos en el Sitio de Disposición Final de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, 1-4. Obtenido de <http://www.uninorte.co/divisiones/Ingenierias/IDS/upload/File/Memorias%20II-SIIR/3g-Njera-M%20xico-001.pdf>
- Nájera, H. A., Gómez, J. M., García, C., Gutiérrez, R. y Rojas-Valencia, M. N. (2010). Manejo de Biogás y Lixiviados en Rellenos Sanitarios del Centro de México, un Panorama General. (E. d. UNICACH, Ed.) Lacandonia, 4(2), 117-127. Obtenido de <http://cuid.unicach.mx/revistas/index.php/lacandonia/article/view/217>
- Nájera, H., Vázquez-Sánchez, R., Gutiérrez, R., Bello, R. y Rojas-Valencia, M. (2011). Physicochemical Treatment (Coagulation-Flocculation-Fenton) of Mature Leachates from Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Landfill. Sustain. Environ. Res., 21(5), 313-319. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10092/9133>
- Nobel, Cavelier y Andrade. (1992). Mucilage in Cacti: Its Apoplastic Capacitance, Associates Solutes and Influence on Tissue Water Relations. J. Exp. Bot., 43(5), 641-648. doi: 10.1093/jxb/43.5.641
- Ntampou, X., Zouboulis, A. y Samaras, P. (2006). Appropriate Combination of Physico-Chemical Methods (Coagulation/Flocculation and Ozonation) for the Efficient Treatment of Landfill Leachates. Chemosphere, 62(5), 722-730. doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.04.067
- Orta, M. T. y Monje-Ramírez, I. (2006). Combined Pre-Treatment of Coagulation- Ozonation for Saline- Stabilized Landfill Leachates. Ozone: Science and Engineering. The Journal of the International Ozone Association, 28(5), 309-316. doi:10.1080/01919510600900241
- Ozacar, M. y Sengil, I. A. (2003). Evaluation of Tannin Biopolymer as a Coagulant Aid for Coagulation of Colloidal Particles. Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 229, 85-96. doi: 10.1016/j.colsurfa.2003.07.006
- Paulsen y Luna. (1979). Water-Soluble Polysaccharides of *Opuntia ficus-indica* cv "Burbank's Spineless". Phytochemistry (18), 569-571. doi: 10.1016/S0031-9422(00)84262-4
- Pizzi, N. (2005). Water Treatment Operator Handbook (Segunda ed.). Estados Unidos de Norteamérica: American Water Works Association.
- Proferfol. (2012). Ácidos Húmicos. Consultado el 12 de octubre de 2016, de <http://proferfol.es/pdf/acidoss%20humicos.pdf>
- Renault, F., Sancey, B., Badot, P. y Cirini, G. (2009). Chitosan for Coagulation/Flocculation Processes. An Eco-Friendly Approach. Polimer Journal, 1(45), 1337-1348. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2008.12.027
- Renou, S. y Givaudan, J. G. (2008). Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity. Journal of Hazardous Materials, 150(3), 468-493. doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.077
- Rigola, M. (1999). Tratamiento de Aguas Industriales: Aguas de Proceso y Residuales. Barcelona, España: Alfaomega-Marcombo. Consultado el 12 de octubre de 2016, de https://books.google.com.mx/books/about/Tratamiento_de_aguas_industriales.html?id=fQcXUq9WFC8C&redir_esc=y
- Ríos, R. J. y Quintana, M. (diciembre de 2004). Manejo General del Cultivo del Nopal. (Postgraduados, Ed.) México, DF, México: Secretaría de la Reforma Agraria. Consultado el 12 de octubre de 2016, de http://www.elquiglobalenergy.com/english/datas/Manejo_general_cultivo_Nopal.pdf

- Ritchie, J. D. y Purdue, E. M. (2003). Proton-Binding Study of Standard and Reference Fulvic Acids, Humic Acids, and Natural Organic Matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(1), 85-96. doi:10.1016/S0016-7037(02)01044-X
- Rivas, J., Beltrán, F., Carvallo, F., Acevedo, B. y Gimeno, O. (2004). Stabilized Leachates: Sequential Coagulation-Flocculation + Chemical Oxidación Process. *Journal Hazardous Materials*, 116(1), 95-102. doi: 10.1016/j.jhazmat.2004.07.022
- Robles, F. (2008). Generación de Biogás y Lixiviados en los Rellenos Sanitarios. México, D.F., México: IPN.
- Rodríguez, F. (2003). Procesos de Potabilización del Agua e Influencia del Tratamiento de Ozonización. Madrid, España: Díaz de Santos. Consultado el 12 de octubre de 2016, de <http://www.editdiazdesantos.com/libros/rodriguez-vidal-francisco-javier-procesos-de-potabilizacion-del-agua-e-influencia-del-tratamiento-de-ozonizacion-C03005870101.html#contenido>
- Rodríguez, S., Martínez, H. E., Macías, L. y Chávez, C. K. (2012). Cromatografía de Capa Delgada Aplicada a la Caracterización de Mucílago de *Opuntia hiptiacantha*. II Simposio de Biotecnología Alimentaria y Ambiental (págs. 9-12). Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana.
- Rodríguez, S., Martínez, H. E., Ornelas, J. L. y Garnica, M. G. (2011). Carteles del Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería: Optimización de la Extracción del Mucílago de Nopal. En S. M. Bioingeniería (Ed.). (págs. 1-3). Querétaro: SMBB.
- Rojas-Valencia, M. N. (2011). Manejo Integral de Residuos Sólidos, impacto ambiental y costos. *Ingeniería Civil*, 477(1), 12-16. Consultado el 11 de octubre de 2016, de https://www.researchgate.net/publication/265086581_Manejo_integral_de_residuos_solidos_impacto_ambiental_y_costos
- Rojas-Valencia, M. N. y Sahagún, C. (2012). Determining the Effects of Leachates Infiltrating Crop Areas. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 94(2), 327-339. doi:10.1080/02772248.2011.648941
- Rosales, A. G. (2014). Procesos de Oxidación Avanzada Tipo Fenton con y sin Luz Solar para el Tratamiento de Lixiviados Pretratados de Rellenos Sanitarios. Tesis de Maestría, UNAM, 40, 44-47. Consultado el 12 de octubre de 2016, de www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/6965
- Saag, L., Sanderson, G., Moya, P. y Ramos, G. (1975). Cactaceae Mucilage Composition. *J. Sci. Food Agric.*, 26(7), 993-1000. doi:10.1002/jsfa.2740260716
- Sáenz y Sepúlveda. (1993). Alternativas de Industrialización de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*). *Alimentos*, 68(1), 29-32. Consultado el 5 de octubre de 2017, de http://agris.fao.org/agris-search/search.do;jsessionid=E39FA75A1BF29EBF626FD3E9426DE4F5?request_locale=es&recordID=CL19940113244&sourceQuery=&query=&sortField=&sortOrder=&agrovocString=&advQuery=¢erString=&enableField=
- Sáenz, C., Berger, H., Corrales, J., Galleti, L., García de Cortázar, V. y Higuera, I. (2006). Utilización Agroindustrial del Nopal. *Boletín de Servicios Agrícolas (Segunda ed.)*. (AGST, Ed.) Roma, Italia: FAO. Consultado el 10 de octubre de 2016, de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=llaxInmJjFoC&oi=fnd&pg=PP12&dq=Utilizaci%C3%B3n+agroindustrial+del+nopal.+Bolet%C3%ADn+de+Servicios+Agr%C3%ADcol+as&ots=AdL4y_Bm3z&sig=JvPNxRIHyPutIbt4SYU9jGFYNJs&redir_esc=y#v=onepage&q=Utilizaci%C3%B3n%20agr
- San Pedro, L. (2015). Tratamiento de Lixiviados Mediante Fenton-adsorción. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Yucatán, 10-12.

- Sciban, M., Klansnja, M. y Stojimirovic, J. (2005). Investigation of Coagulation Activity of Natural Coagulants. *Acta Periodica Technologica*, 36, 81-90. doi:10.2298/APT0536081S
- SEDEMA (2017). Secretaría del Medio Ambiente. Norma 024 de separación de residuos. Consultado el 16 de agosto de 2017, de <http://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/imparte-sedema-taller-sobre-norma-024-de-separacion-de-residuos-al-sector-hotelero-de-la-cdmx>.
- SEDESOL (2017). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Acciones y Programas. Residuos Sólidos Urbanos. Información. Consultado el 23 de agosto de 2017, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>.
- Selman, A. (1980). En *Humus: Origin, Chemical Composition and Importance in Nature* (págs. 25-29). Baltimore, Estados Unidos de Norteamérica: The Williams and Wilkins Company. Consultado el 11 de octubre de 2016, de http://journeytoforever.org/farm_library/Waksman_Humus.pdf
- SEMARNAT. (2006) Los productos y los impactos de la descomposición de los residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, Instituto Nacional de Ecología, abril 2006 (79), 39-40.
- SEMARNAT. (2009). Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME). Consultado el 11 de octubre de 2016, de http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/publicaciones_con_agua/RESIDUOS%20PELIGROSOS/MANU-ESP-TEC2010.pdf
- SEMARNAT. (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Consultado el 11 de octubre de 2016, de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf
- SEMARNAT. (2013). Plan Nacional de Desarrollo (2013-2018). Programa Sectorial de Medio Ambiente y recursos Naturales. 1, 12-19. Consultado el 11 de enero de 2017, de <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/Documents/PROMARNAT%202013-2018.pdf>
- SEMARNAT, (2014). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. El Medio Ambiente en México. Generación de residuos sólidos urbanos. Consultado el 16 de agosto de 2017, de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_1.html%0A
- SEMARNAT. (2016). Plan Nacional de Desarrollo. Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Vol. 1). (PROMARNAT, Ed.) Consultado el 11 de octubre de 2016, de <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/Documents/PROMARNAT%202013-2018.pdf>
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E. y Aceituno, C. (2007). Extraction and Characterization of Mucilage in *Opuntia spp.* *Journal of Arid Environments*, 68(4), 534-545. doi:doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.08.001
- Sepúlveda, Sáenz y Gómez. (2003). Comportamiento Reológico de Néctar Elaborado con Hidrocoloide de Nopal: Efecto del Tratamiento Térmico. *Memorias IX Congreso Nacional y VII Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Zacatecas, México, 269-272.
- SINAREFI. (2016). Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura. Consultado el 12 de enero de 2016, de www.sinarefi.org.mx/

- Sincero, A. P. y Sincero, G. A. (2003). *Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater*. (I. Publishing, Ed.) Baltimore, Estados Unidos de Norteamérica: CRC Press. Consultado el 11 de octubre de 2016, de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=c4e9BwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=physical-chemical+treatment+of+water+and+wastewater&ots=50uveJoBrW&sig=_iPE9ZNo_H475rWHUeWs_xPDWjM&redir_esc=y#v=onepage&q=physical-chemical%20treatment%20of%20water%20and%20wast
- SNF. (2014). *Coagulación-Floculación*. Manuales de Uso de Productos. Andrézieux, Francia: SNF Floerger. Consultado el 11 de octubre de 2016, de <http://www.snf.us/wp-content/uploads/2014/08/Coagulation-Flocculation.pdf>
- Solís Silvan, R., Lainés Canepa, J. y Hernández Barajas, J. (2012). Mezclas con Potencial Coagulante para Clarificar Aguas Superficiales. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 28(3), 229-236. Consultado el 11 de octubre de 2016, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v28n3/v28n3a5.pdf>
- Soto, E., Lozano, T., Barbarín, J. y Alcalá, M. (2004). Remoción de Metales Pesados en Aguas Residuales Mediante Agentes Químicos. *Ingenierías*, 7(23), 46-51. Consultado el 11 de octubre de 2016, de http://eprints.uanl.mx/10138/1/23_p46a51_soto.pdf
- Spellman, F. (2008). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations* (Tercera ed.). Boca Ratón, Florida, Estados Unidos de Norteamérica: CRC Press. Consultado el 11 de octubre de 2016, de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=JH3NBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Handbook+of+water+and+wastewater+treatment+plant+operations&ots=3tXIGBufGi&sig=BB9yr3GIJVb0lftMkkml_T_N9uU&redir_esc=y#v=onepage&q=Handbook%20of%20water%20and%20wastewater%20trea
- Tatsi, A. A., Zouboulis, A., Matis, K. A. y Samaras, P. (2003). Coagulation-Flocculation Pretreatment of Sanitary Landfill Leachates. *Chemosphere*, 53(7), 737-744. doi:10.1016/S0045-6535(03)00513-7
- Tchobanoglous, T., Theisen, H. y Vigil, S. A. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos* (Primera ed., Vol. I). Madrid, España: Mc Graw Hill Interamericana de España.
- Tillman, G. (1996). *Water Treatment: Troubleshooting and Problem Solving*. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos de Norteamérica: CRC Press LCC. Consultado el 11 de octubre de 2016, de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=fzwRVcv5rnQC&oi=fnd&pg=PA141&dq=Water+treatment:+troubleshooting+and+problem+solving&ots=Ui6sFvwyA9&sig=FArSSI_8-dZ79WZ7HS9A-3hQw5g&redir_esc=y#v=onepage&q=Water%20treatment%3A%20troubleshooting%20and%20probl
- Trachtenberg, S. y Mayer, A. (1981). Composición and Propoities of *Opuntia ficus-indica* Mucilage. *Phytochemistry*, 20(12), 2665-2668. doi:10.1016/0031-9422(81)85263-6
- Trachtenberg, S. y Mayer, A. (1982). Mucilage Cells, Calcium Oxalate Crystals and Soluble Calcium in *Opuntia ficus-indica*. *Ann. Bot.*, 50(4), 549-557. doi: 10.1093/oxfordjournals.aob.a086395
- Trejo, R. (2012). *Determinación de la Combinación y Dosis Óptimas de Policloruro de Aluminio y Polímero Floculante para el Tratamiento del Influyente de la Planta Potabilizadora Los Berros*. UNAM. Tesis de Maestría, 32. Consultado el 12 de octubre de 2016, de http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/333/browse?rpp=20&order=ASC&sort_by=1&etal=-1&type=title&starts_with=D

- Vargas-Rodríguez y Ramos-Ramírez (2003). Un método simple de extracción en nopal verdura. I Congreso de Ingeniería Agroindustrial. Universidad de Chapingo, México.
- Vargas, L. D. (2004). Floculación. Tratamiento de Agua para Consumo Humano (Primer ed.). (OPS, Ed.) CEPIS.
- Vera, P. (2011). Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial. En R. González Herrera, H. Nájera Aguilar y C. García Lara, Estudios ambientales y riesgos naturales (Primera ed., pág. 61). Tuxtla Gutierrez, Chiapas, México: UNICACH. Consultado el 11 de octubre de 2016, de <http://cuid.unicach.mx/plantillas/ai/download.php?file=J+Estudios+Ambientales+y+Riesgos+Naturales2.pdf&direct=produccion>.
- Vrale y Jordan. (1994). Rapid Mixing in Water Treatment. AWWA Seminar of Upgrading Existing Water Treatment Plants.
- Wang, L., Hung, Y. y Shaamas, N. (2005). Physicochemical Treatment Processes. En Springer, Handbook of Environmental Engineering (Segunda ed., Vol. 3, pág. 744). Estados Unidos de Norteamérica: Humana Press. Consultado el 11 de octubre de 2016, de <https://link.springer.com/book/10.1385/159259820x>
- Weber, W. (2003). Control de la Calidad del Agua (Segunda ed.). Barcelona, España: Reverté. Consultado el 11 de octubre de 2016, de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=TLpzh5HQYvgC&oi=fnd&pg=PA1&dq=control+de+la+calidad+del+agua+procesos+fisicoqu%C3%ADmicos+weber+&ots=hPh_Jw5UD&sig=YYW1ckWt0BzBk2bG3d4p418RUj4&redir_esc=y#v=onepage&q=control%20de%20la%20calidad%20del%20agua
- Westall, J., Jones, J., Turner, G. y Zachara, J. (1995). Models for Association of Metal Ions with Heterogeneous Environmental Sorbents. 1. Complexation of Co(II) by Leonardite Humic Acid as a Function of pH and NaClO₄ Concentration. Environ. Sci. Technol. (24), 951-960. doi:10.1021/es00004a015
- Williams, P. A. (2007). Handbook of Industrial Water Soluble Polymers. East Wales, Reino Unido: Blackwell Publishing. Consultado el 12 de octubre de 2016, de https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=E_uuzF-PCHwC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Handbook+of+Industrial+Water+Soluble+Polymers&ots=uZz3iW9Pmg&sig=jpkqvS--Grp_2FOwQozLpW0OLn8&redir_esc=y#v=onepage&q=Handbook%20of%20Industrial%20Water%20Soluble%20Polymers&f=fal
- Zamudio, E. (2014). Acoplamiento de Proceso de Coagulación-Floculación por Biopolímeros y Desinfección por Ozono. Tesis de Doctorado, UPIBI, IPN, 45-50. Consultado el 12 de octubre de 2016, de http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/19534/Evelyn_Zamudio.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Zhang, J., Zhang, F., Lou, Z. y Yang, H. (2006). A Preliminary Study on Cactus as Coagulant in Water Treatment. Process Biochemistry, 41(3), 730-733. doi: 10.1016/j.procbio.2005.08.016

9.- ANEXOS

9.1.- Datos experimentales

9.1.1.- Experimentación etapa I. Uso de cloruro férrico

Tabla 9.1. Resultados en experimentación etapa I

Experimento	pH	Coagulante		Floculante		Parámetros					
						pH			Turbiedad (UTN)		
						R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	7.0	1.4	3.2	0.10	20.9	7.40	6.99	7.10	88.0	77.0	79.0
2	7.0	2.2	5.0	0.10	21.0	7.25	6.77	6.82	28.0	23.0	33.0
3	7.0	3.0	6.9	0.10	21.1	7.01	6.50	6.87	8.0	11.0	13.0
4	7.0	1.4	3.2	0.15	32.1	7.51	7.09	7.38	16.0	21.0	22.2
5	7.0	2.2	5.0	0.15	32.2	7.17	6.80	7.12	13.0	18.0	18.4
6	7.0	3.0	6.9	0.15	32.4	7.06	6.57	6.88	23.0	21.0	23.2
7	7.0	1.4	3.2	0.20	43.8	6.99	6.83	6.81	20.0	26.9	26.7
8	7.0	2.2	5.0	0.20	43.9	6.90	6.68	6.62	33.0	25.9	29.4
9	7.0	3.0	6.9	0.20	44.1	6.72	6.48	6.66	30.0	23.5	52.8
10	6.0	1.4	3.2	0.10	20.9	4.86	5.41	5.20	9.0	10.9	11.0
11	6.0	2.2	5.0	0.10	21.0	3.20	3.57	3.80	63.0	60.0	61.2
12	6.0	3.0	6.9	0.10	21.1	3.03	3.00	3.20	130.0	93.9	99.6
13	6.0	1.4	3.2	0.15	32.1	5.20	4.08	4.40	10.0	5.3	8.5
14	6.0	2.2	5.0	0.15	32.2	3.29	2.75	3.21	12.0	6.3	9.9
15	6.0	3.0	6.9	0.15	32.4	2.93	2.73	2.84	18.0	6.4	6.9
16	6.0	1.4	3.2	0.20	43.8	5.33	3.08	3.39	11.0	18.2	12.2
17	6.0	2.2	5.0	0.20	43.9	3.37	2.87	3.10	15.0	9.5	11.6
18	6.0	3.0	6.9	0.20	44.1	2.96	2.73	2.74	12.2	8.8	8.9
Lixiviados crudos						8.87			50.0		

R1, R2 y R3: repeticiones realizadas en los experimentos. UTN: unidad nefelométrica de turbidez

Tabla 9.1. Resultados de experimentación etapa I (continuación)

Experimento	Parámetros										
	Color (U Pt-Co)			DQO (mg/L)			DBO ₅	IB	Índice de Willcomb		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1 (mg/L)		R1	R2	R3
1	3240	2730	3110	1325	1290	1262	22.0	0.017	6	8	8
2	2010	1440	1620	1094	1040	1058	21.50	0.02	8	8	8
3	1110	1100	1130	1080	1060	1084	21.80	0.02	10	10	10
4	1580	1660	1600	1190	1160	1152	21.00	0.018	10	8	8
5	1290	1300	1280	1025	1070	1052	26.00	0.024	10	10	10
6	1710	1600	1702	1060	1100	1076	18.00	0.017	10	10	10
7	1650	1590	1641	93.5	9.04	95.4	21.50	0.023	8	8	8
8	2190	1680	1728	1010	1040	1005	22.60	0.022	8	10	10
9	2750	1850	1907	831	840	852	20.70	0.025	10	10	10
10	46.0	230	280	665	630	652	21.80	0.033	10	10	10
11	170.0	190.0	210.0	740	700	724	22.60	0.031	10	10	8
12	239.0	199.0	250.0	795	509	662	20.20	0.029	10	8	8
13	710	740	780	990	890	921	20.00	0.021	10	10	10
14	610	1220	980	850	860	841	21.00	0.025	10	10	10
15	1700	1200	1320	690	630	652	18.00	0.027	8	10	8
16	680	860	660	710	702	738	22.00	0.031	10	10	8
17	800	1200	920	750	741	762	23.00	0.031	10	8	8
18	2660	1590	1800	800	860	821	20.60	0.025	10	10	10
LC	4110			2110			34.80	0.016			

LC: Lixiviados crudos. **IB:** índice de biodegradabilidad= DBO₅/DQO promedio de repeticiones. **R1, R2 y R3:** repeticiones realizadas en los experimentos. **U Pt-Co:** Unidades de color platino-cobalto

Tabla 9.1. Resultados de experimentación etapa I (continuación)

Experimento	Parámetro						
	Lodos generados* (g en 500 mL de LT)			Lodos generados* (kg/m ³ LT)			
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	Promedio
1	5.1	6.4	6.6	10.2	12.8	13.2	12.07
2	6.9	6.9	6.1	13.8	13.8	12.2	13.27
3	9.2	10.6	9.0	18.4	21.2	18.0	19.20
4	6.5	7.6	6.6	13.0	15.2	13.2	13.80
5	8.3	10.1	8.4	16.6	20.2	16.8	17.87
6	13.2	15.9	12.2	26.4	31.8	24.4	27.53
7	8.8	8.6	8.5	17.6	17.2	17.0	17.27
8	13.2	12.1	11.2	26.4	24.2	22.4	24.33
9	16.1	12.0	13.4	32.2	24.0	26.8	27.67
10	18.7	19.0	15.2	37.4	38.0	30.4	35.27
11	18.9	13.7	15.7	37.8	27.4	31.4	32.20
12	19.0	17.1	15.2	38.0	34.2	30.4	34.20
13	12.3	12.0	11.6	24.6	24.0	23.2	23.93
14	21.3	16.2	18.2	42.6	32.4	36.4	37.13
15	21.0	18.7	20.6	42.0	37.4	41.2	40.20
16	13.7	12.1	12.0	27.4	24.2	24.0	25.20
17	28.8	24.1	20.4	57.6	48.2	40.8	48.87
18	23.6	21.0	22.5	47.2	42.0	45.0	44.73

R1, R2 y R3: Repeticiones de experimentos. **LT:** Lixiviados tratados. *: Base húmeda

9.1.2.- Experimentación etapa II. Uso de poliamina

Tabla 9.2. Resultados de experimentación etapa II

Experimento	pH	Coagulante		Floculante		Parámetros					
						pH			Turbiedad (UTN)		
						R1	R2	R3	R1	R2	R3
		g/L	mL solución	g/L	mL solución						
1	8.0	0.50	3.4	0.015	3.0	8.13	8.36	8.32	26.0	17.0	17.0
2	8.0	0.75	5.1	0.015	3.0	8.17	8.34	8.22	26.8	29.0	28.2
3	8.0	1.00	6.8	0.015	3.1	8.12	8.35	8.31	50.0	56.0	50.0
4	8.0	0.50	3.4	0.025	5.1	8.14	8.34	8.28	13.0	7.8	9.2
5	8.0	0.75	5.1	0.025	5.1	8.12	8.37	8.30	23.0	25.0	27.0
6	8.0	1.00	6.8	0.025	5.1	8.15	8.38	8.18	31.0	28.0	31.0
7	8.0	0.50	3.4	0.035	7.1	8.25	8.21	8.22	11.0	11.0	14.0
8	8.0	0.75	5.1	0.035	7.2	8.25	8.23	8.25	27.0	26.0	25.0
9	8.0	1.00	6.8	0.035	7.2	8.27	8.26	8.27	20.0	24.0	22.0
10	7.0	0.50	3.4	0.015	3.0	7.83	7.71	7.78	15.0	14.0	19.0
11	7.0	0.75	5.1	0.015	3.0	7.83	7.55	7.50	38.0	41.0	41.0
12	7.0	1.00	6.8	0.015	3.1	7.97	7.89	7.90	36.0	40.0	41.0
13	7.0	0.50	3.4	0.025	5.1	7.59	7.80	7.81	8.0	7.0	11.9
14	7.0	0.75	5.1	0.025	5.1	7.42	7.64	7.49	38.0	35.0	35.2
15	7.0	1.00	6.8	0.025	5.1	7.47	7.61	7.55	48.0	46.0	41.0
16	7.0	0.50	3.4	0.035	7.1	7.53	7.60	6.60	11.0	12.0	10.2
17	7.0	0.75	5.1	0.035	7.2	7.53	7.62	7.53	39.0	43.0	29.1
18	7.0	1.00	6.8	0.035	7.2	7.61	7.61	7.58	57.0	58.0	50.0
Lixiviados crudos						8.87			50.0		

R1, R2 y R3: repeticiones realizadas en los experimentos. **UTN:** unidad nefelométrica de turbidez

Tabla 9.2. Resultados de experimentación etapa II (continuación)

Experimento	Parámetros										
	COLOR (U Pt-Co)			DQO (mg/L)			DBO ₅	IB	Índice de Willcomb		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1 (mg/L)		R1	R2	R3
1	1630	1790	1712	1430	1530	1480	28.10	0.019	10	10	10
2	1920	2050	1996	1120	1240	1180	31.30	0.026	6	8	8
3	2480	2750	2496	1550	1540	1620	31.10	0.02	6	6	6
4	1940	1640	1702	1440	1480	1460	33.90	0.023	10	10	10
5	1970	2130	1997	1490	1570	1520	29.60	0.019	8	8	8
6	2570	2710	2604	1500	1510	1602	33.00	0.021	6	6	6
7	2250	1690	1744	1630	1640	1610	31.20	0.019	8	8	8
8	1970	1920	1882	1550	1600	1540	30.6	0.02	7	6	6
9	2270	1970	2001	1550	1570	1560	29.9	0.019	6	6	6
10	2010	169.0	1804	1270	1320	1320	33.1	0.025	10	10	10
11	2060	2060	2107	1590	1630	1600	31.2	0.019	8	6	8
12	2520	2500	2389	1520	1560	1580	30.9	0.02	6	6	6
13	1650	1810	1703	1450	1350	1400	322	0.023	10	10	10
14	1950	2250	2107	1380	1380	1420	31.1	0.022	8	8	8
15	2780	2580	2609	1480	1400	1395	30.8	0.022	6	6	6
16	1770	1870	1802	1390	1310	1352	331	0.024	8	8	8
17	2300	2260	2291	1440	1350	1369	32.2	0.023	8	8	8
18	2990	2690	2801	1730	1680	1702	31.1	0.018	6	8	8
LC	4110.0			2110			34.8	0.016			

LC: Lixiviados crudo. **IB:** índice de biodegradabilidad= DBO₅/DQO promedio de repeticiones. **R1, R2 y R3:** repeticiones realizadas en los experimentos. **U Pt-Co:** Unidades de color platino-cobalto

Tabla 9.2. Resultados de experimentación, etapa II (continuación)

Experimento	Parámetro						
	Lodos generados* (g en 500 mL de LT)			Lodos generados* (kg en m ³ de LT)			
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	Promedio
1	3.6	3.6	3.2	7.2	7.2	6.4	6.93
2	2.1	2.1	2.3	4.2	4.2	4.6	4.33
3	2.0	2.0	1.9	4.0	4.0	3.8	3.93
4	3.4	3.4	3.9	6.8	6.8	7.8	7.13
5	2.1	2.1	1.6	4.2	4.2	3.2	3.87
6	2.2	2.2	1.7	4.4	4.4	3.4	4.07
7	2.3	2.5	2.2	4.6	5.0	4.4	4.67
8	2.4	2.3	2.0	4.8	4.6	4.0	4.47
9	2.4	2.2	2.1	4.8	4.4	4.2	4.47
10	2.7	3.2	2.8	5.4	6.4	5.6	5.80
11	2.2	2.3	2.4	4.4	4.6	4.8	4.60
12	2.0	2.5	2.2	4.0	5.0	4.4	4.47
13	2.4	2.2	2.0	4.8	4.4	4.0	4.40
14	2.5	2.3	2.1	5.0	4.6	4.2	4.60
15	2.5	2.2	2.3	5.0	4.4	4.6	4.67
16	2.4	2.1	2.4	4.8	4.2	4.8	4.60
17	2.5	1.9	2.2	5.0	3.8	4.4	4.40
18	2.2	1.8	2.0	4.4	3.6	4.0	4.00

R1, R2 y R3: Repeticiones de experimentos. LT: Lixiviados tratados. *: Base húmeda

9.1.3.- Experimentación etapa III. Uso de mucílago de nopal

Tabla 9.3. Resultados de experimentación etapa III

Experimento	pH	Coagulante		Bentonita	Parámetros					
		g/L	mL solución		pH			Turbiedad (NTU)		
				g/L	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	7.0	0.50	26.3	1.0	7.52	7.60	7.50	45.9	42.0	40.1
2	7.0	0.75	40.5	1.0	7.81	7.85	7.88	58.2	57.0	60.1
3	7.0	1.00	55.6	1.0	7.88	7.90	7.85	66.7	61.0	62.1
4	7.0	0.50	26.3	2.0	7.25	7.32	7.30	64.3	65.0	61.2
5	7.0	0.75	40.5	2.0	7.42	7.46	7.44	72.9	72.0	70.1
6	7.0	1.00	55.6	2.0	7.49	7.50	7.52	73.8	78.0	74.2
7	7.0	0.50	26.3	3.0	7.55	7.56	7.52	59.8	73.0	66.1
8	7.0	0.75	40.5	3.0	7.51	7.54	7.48	94.9	81.0	85.4
9	7.0	1.00	55.6	3.0	7.56	7.61	7.59	76.4	90.0	88.1
10	6.0	0.50	26.3	1.0	6.67	6.75	6.66	61.4	73.0	68.4
11	6.0	0.75	40.5	1.0	6.35	6.62	6.58	71.2	87.0	80.1
12	6.0	1.00	55.6	1.0	6.43	6.56	6.50	75.0	86.0	80.4
13	6.0	0.50	26.3	2.0	6.48	6.99	6.80	73.4	69.0	71.8
14	6.0	0.75	40.5	2.0	6.52	6.91	6.64	69.9	66.0	66.9
15	6.0	1.00	55.6	2.0	6.42	6.91	6.84	66.5	67.0	67.5
16	6.0	0.50	26.3	3.0	6.58	6.76	6.72	79.0	86.0	81.7
17	6.0	0.75	40.5	3.0	6.58	6.67	6.56	94.0	92.0	90.7
18	6.0	1.00	55.6	3.0	6.69	6.77	6.70	93.8	82.0	89.1
Lixiviados crudos					8.87			50.0		

R1, R2 y R3: repeticiones realizadas en los experimentos. **UTN:** unidad nefelométrica de turbidez

Tabla 9.3. Resultados de experimentación etapa III (continuación)

Experimento	Parámetros										
	Color (U Pt-Co)			DQO (mg/L)			DBO ₅	IB	Índice de Willcomb		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1 (mg/L)		R1	R2	R3
1	3690	3220	3407	900	920	910	22.0	0.024	8	8	8
2	2510	2880	2648	965	945	962	21.2	0.022	8	8	8
3	3390	3590	3454	890	880	895	20.6	0.023	6	6	6
4	3260	3040	3154	800	760	795	22.8	0.029	6	6	6
5	3570	2930	3201	745	714	721	21.6	0.030	8	8	8
6	3350	3150	3194	810	780	802	22.2	0.027	10	10	10
7	2780	2770	2842	840	850	832	24.6	0.029	8	8	8
8	2960	2740	2709	805	830	795	23.8	0.028	8	8	8
9	2650	2820	2801	900	880	932	25.2	0.028	10	10	10
10	3500	3620	3649	890	920	962	23.9	0.026	8	8	8
11	3300	3620	3587	925	902	895	22.4	0.025	8	8	8
12	3440	3530	3501	1130	1100	1152	22.2	0.020	8	8	8
13	2960	2320	2681	810	780	765	19.9	0.025	8	8	8
14	2800	3130	3001	915	898	882	29.7	0.033	6	8	8
15	2580	3120	2804	930	945	925	27.3	0.029	8	8	8
16	2520	2520	2593	800	785	825	25.2	0.031	8	8	10
17	2730	2770	2701	650	595	584	19.7	0.032	10	10	10
18	2310	2600	2691	590	550	532	15.5	0.028	10	10	10
LC	4110.0			2110.0			34.8	0.016			

LC: Lixiviados crudos. **IB:** índice de biodegradabilidad= DBO₅/DQO promedio de repeticiones. **R1, R2 y R3:** repeticiones realizadas en los experimentos. **U Pt-Co:** Unidades de color platino-cobalto

Tabla 9.3. Resultados de experimentación etapa III (continuación)

Experimento	Parámetros						
	Lodos generados* (g en 500 mL de LT)			Lodos generados* (kg en m ³ de LT)			
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	Promedio
1	3.2	2.6	2.8	6.4	5.2	5.6	5.73
2	3.8	2.7	2.9	7.6	5.4	5.8	6.27
3	2.6	2.8	2.9	5.2	5.6	5.8	5.53
4	5.7	4.7	4.9	11.4	9.4	9.8	10.20
5	6.6	5.4	5.0	13.2	10.8	10.0	11.33
6	6.4	5.6	6.6	12.8	11.2	13.2	12.40
7	7.7	8.0	7.9	15.4	16.0	15.8	15.73
8	7.5	7.5	7.2	15.0	15.0	14.4	14.80
9	7.8	8.2	8.0	15.6	16.4	16.0	16.00
10	2.4	3.4	3.1	4.8	6.8	6.2	5.93
11	2.6	2.8	2.9	5.2	5.6	5.8	5.53
12	2.6	2.9	2.7	5.2	5.8	5.4	5.47
13	5.2	5.2	4.8	10.4	10.4	9.6	10.13
14	5.0	5.3	5.4	10.0	10.6	10.8	10.47
15	6.0	5.5	5.8	12.0	11.0	11.6	11.53
16	7.6	7.0	7.1	15.2	14.0	14.2	14.47
17	8.2	8.3	8.0	16.4	16.6	16.0	16.33
18	7.2	8.1	7.9	14.4	16.2	15.8	15.47

R1, R2 y R3: Repeticiones de experimentos. LT: Lixiviados tratados. *: Base húmeda

9.2.- Datos ingresados y valores estadísticos generados en Minitab

9.2.1.- Experimentación etapa I. Uso de cloruro férrico

Tabla 9.4. Datos ingresados al programa Minitab, experimentación etapa I

pH	Coagulante (g/L)	Floculante (g/L)	% Remoción DQO		
			R1	R2	R3
7.0	1.4	0.10	21.3	38.9	40.2
7.0	2.2	0.10	36.5	50.7	49.8
7.0	3.0	0.10	39.3	49.8	48.6
7.0	1.4	0.15	34.1	45.0	45.4
7.0	2.2	0.15	37.4	49.3	50.1
7.0	3.0	0.15	45.0	47.9	49.0
7.0	1.4	0.20	46.4	55.5	54.8
7.0	2.2	0.20	42.6	50.7	52.4
7.0	3.0	0.20	51.2	60.2	59.6
6.0	1.4	0.10	63.9	70.1	69.1
6.0	2.2	0.10	64.9	66.8	65.7
6.0	3.0	0.10	63.0	72.0	68.6
6.0	1.4	0.15	52.6	57.8	56.3
6.0	2.2	0.15	59.7	59.2	60.1
6.0	3.0	0.15	67.3	55.9	69.1
6.0	1.4	0.20	66.3	56.9	65.0
6.0	2.2	0.20	64.4	60.2	63.9
6.0	3.0	0.20	62.0	59.2	61.0

R1, R2 y R3: repeticiones en la experimentación

Tabla 9.5. Análisis de variables y coeficientes, experimentación etapa I

Coeficientes codificados					
Término	Coeficiente	EE del coeficiente	Valor T	Valor p	FIV
Constante	52.840	1.030	51.08	0.000	
pH	-7.544	0.598	-12.6	0.000	1
Coagulante (g/L)	1.618	0.733	2.21	0.032	1
Floculante (g/L)	1.200	0.732	1.64	0.108	1
Floculante (g/L) *Floculante (g/L)	3.970	1.270	3.14	0.003	1
pH*Floculante (g/L)	3.709	0.732	5.07	0.000	1
Ecuación de regresión en unidades no codificadas					
% Remoción DQO = 323.2 - 37.34 pH + 2.022 Coagulante (g/L) - 1417 Floculante (g/L)					

Fuente: Minitab

Tabla 9.6. Datos de optimización de porcentaje de remoción de DQO, experimentación etapa I

Optimización de respuesta: % Remoción DQO						
Parámetros						
Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
% Remoción DQO	Máximo	36.4929	72.0379		1	1
Solución						
Solución	pH	Coagulante (g/L)	Floculante (g/L)	% Remoción DQO ajuste	Deseabilidad compuesta	
1	6	3	0.1	68.478	0.899849	
Predicción de respuesta múltiple						
Variable		Valor de configuración				
pH		6				
Coagulante (g/L)		3				
Floculante (g/L)		0.1				
Respuesta		Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%	
% Remoción DQO		68.48	1.55	(65.35, 71.60)	(59.35, 77.61)	

Fuente: Minitab

Tabla 9.7. Análisis de varianza, experimentación etapa I

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	3586.86	717.37	39.56	0
Lineal	3	2974.11	991.37	54.67	0
pH	1	2884.95	2884.95	159.1	0
Coagulante	1	88.33	88.33	4.87	0.032
Floculante	1	48.72	48.72	2.69	0.108
Cuadrado	1	178.58	178.58	9.85	0.003
Floculante *Floculante	1	178.58	178.58	9.85	0.003
Interacción de 2 factores	1	465.62	465.62	25.68	0
pH*Floculante	1	465.62	465.62	25.68	0
Error	45	815.98	18.13		
Falta de ajuste	12	161.2	13.43	0.68	0.716
Error puro	33	654.78	19.84		
Total	50	4402.84			

Fuente: Minitab

9.2.2.- Experimentación etapa II. Uso de poliamina

Tabla 9.8. Datos ingresados al programa Minitab, experimentación etapa II

pH	Coagulante (g/L)	Floculante (g/L)	% Remoción DQO		
			R1	R2	R3
8.0	0.50	0.015	32.2	27.5	29.9
8.0	0.75	0.015	46.9	41.2	44.1
8.0	1.00	0.015	26.5	27.0	23.2
8.0	0.50	0.025	31.7	29.8	30.8
8.0	0.75	0.025	29.4	25.6	27.9
8.0	1.00	0.025	28.9	28.4	24.1
8.0	0.50	0.035	22.7	22.3	23.7
8.0	0.75	0.035	26.5	24.2	27.0
8.0	1.00	0.035	26.5	25.6	26.1
7.0	0.50	0.015	39.8	37.4	37.4
7.0	0.75	0.015	24.6	22.7	24.2
7.0	1.00	0.015	27.9	26.1	25.1
7.0	0.50	0.025	31.3	36.0	33.6
7.0	0.75	0.025	34.6	34.6	32.7
7.0	1.00	0.025	29.8	33.6	33.9
7.0	0.50	0.035	34.1	37.9	35.9
7.0	0.75	0.035	31.7	36.0	35.1
7.0	1.00	0.035	18.0	20.4	19.3

R1, R2 y R3: Repeticiones en la experimentación

Tabla 9.9. Análisis de variables y coeficientes, experimentación etapa II

Coeficientes codificados					
Término	Coef.	EE del Coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	31.385	0.788	39.84	0	
pH	-2.04	0.469	-5.14	0	1
Coagulante	-3.099	0.549	-5.65	0	1
Floculante	-1.008	0.59	-1.71	0.095	1.01
Floculante *Floculante	-2.976	0.985	-3.02	0.004	1.01
pH*Coagulante	2.304	0.549	4.2	0	1

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\% \text{ Remoción DQO} = 164.4 - 18.64 \text{ pH} - 150.6 \text{ Coagulante (g/L)} + 1387 \text{ Floculante (g/L)} - 29758 \text{ Floculante (g/L) *Floculante (g/L)} + 18.43 \text{ pH*Coagulante (g/L)}$$

Fuente: Minitab

Tabla 9.10. Datos de optimización de porcentaje de remoción de DQO, experimentación etapa II

Optimización de respuesta: % Remoción DQO						
Parámetros						
Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
% Remoción DQO	Máximo	18.0095	39.8104		1	1
Solución						
Solución	pH	Coagulante (g/L)	Floculante (g/L)	% Remoción DQO ajuste	Deseabilidad compuesta	
1	7	0.5	0.0232828	39.2821	0.975766	
Predicción de respuesta múltiple						
Variable		Valor de configuración				
pH		7				
Coagulante (g/L)		0.5				
Floculante (g/L)		0.0232828				
Respuesta	Ajuste			EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
% Remoción DQO	39.28			1.25	(36.70, 41.80)	(32.27, 46.29)

Fuente: Minitab

Tabla 9.11. Análisis de varianza, experimentación etapa II

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	866.93	173.387	16.51	0
Lineal	3	633.08	211.027	20.1	0
pH	1	277.31	277.314	26.41	0
Coagulante (g/L)	1	335.04	335.036	31.91	0
Floculante (g/L)	1	30.65	30.652	2.92	0.095
Cuadrado	1	95.88	95.876	9.13	0.004
Floculante *Floculante	1	95.88	95.876	9.13	0.004
Interacción de 2 factores	1	185.17	185.166	17.64	0
pH*Coagulante	1	185.17	185.166	17.64	0
Error	42	440.96	10.499		
Falta de ajuste	11	348.24	31.658	10.58	0.345
Error puro	31	92.72	2.991		
Total	47	1307.9			

Fuente: Minitab

9.2.3.- Experimentación etapa III. Uso de mucílago de nopal

Tabla 9.12. Datos ingresados al programa Minitab, experimentación etapa III

pH	Coagulante (g/L)	Bentonita (g/L)	% Remoción DQO		
			R1	R2	R3
7.0	0.50	1.0	57.3	56.4	56.9
7.0	0.75	1.0	54.3	55.2	54.4
7.0	1.00	1.0	57.8	58.3	57.6
7.0	0.50	2.0	62.1	63.9	62.3
7.0	0.75	2.0	64.7	66.2	65.8
7.0	1.00	2.0	61.6	63.0	61.9
7.0	0.50	3.0	60.2	59.7	60.6
7.0	0.75	3.0	61.8	60.7	62.3
7.0	1.00	3.0	57.3	58.3	55.8
6.0	0.50	1.0	57.8	56.4	54.4
6.0	0.75	1.0	56.2	57.2	57.6
6.0	1.00	1.0	46.4	47.9	45.4
6.0	0.50	2.0	61.6	63.0	63.7
6.0	0.75	2.0	56.6	57.4	58.2
6.0	1.00	2.0	55.9	55.2	56.2
6.0	0.50	3.0	62.1	62.8	60.9
6.0	0.75	3.0	70.4	71.8	72.3
6.0	1.00	3.0	72.0	73.9	74.8

R1, R2 y R3: Repeticiones en la experimentación

Tabla 9.13. Análisis de variables y coeficientes, experimentación etapa III

Coeficientes codificados					
Término	Coef.	EE del Coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	60.251	0.509	118.38	0.000	
pH	-0.058	0.509	-0.11	0.910	1.00
Coagulante	-0.393	0.627	-0.63	0.534	1.00
Bentonita	4.968	0.627	7.93	0.000	1.00
pH *Bentonita	-2.905	0.627	-4.64	0.000	1.00
Coagulante *Bentonita	2.515	0.774	3.25	0.002	1.01
Ecuación de regresión en unidades no codificadas					
$\% \text{ Remoción DQO} = -8.2 + 11.50 \text{ pH} - 21.69 \text{ Coagulante (g/L)} + 35.19 \text{ Bentonita (g/L)} - 5.81 \text{ pH*Bentonita (g/L)} + 10.06 \text{ Coagulante (g/L) *Bentonita (g/L)}$					

Fuente: Minitab

Tabla 9.14. Datos de optimización de porcentaje de remoción de DQO, experimentación etapa III

Optimización de respuesta: % Remoción DQO						
Parámetros						
Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
% Remoción DQO	Máximo	45.4028	74.7867		1	1
Solución						
Solución	pH	Coagulante (g/L)	Bentonita (g/L)	% Remoción DQO ajuste	Deseabilidad compuesta	
1	6	1.0	3.0	70.3029	0.847406	
Predicción de respuesta múltiple						
Variable		Valor de configuración				
pH		7				
Coagulante (g/L)		1				
Bentonita (g/L)		3				
Respuesta	Ajuste			EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
% Remoción DQO	70.30			1.52	(67.25, 73.35)	(62.26, 78.35)

Fuente: Minitab

Tabla 9.15. Análisis de varianza, experimentación etapa III

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	1332.31	266.463	49.47	0.000
Lineal	3	871.74	290.580	21.23	0.000
pH	1	0.18	0.175	0.01	0.910
Coagulante (g/L)	1	5.39	5.386	0.39	0.534
Bentonita (g/L)	1	859.86	859.861	62.83	0.000
Interacción de 2 factores	2	455.39	227.293	16.64	0.000
pH*Bentonita	1	294.05	294.055	21.49	0.000
Coagulante*Bentonita	1	144.56	144.563	10.56	0.002
Error	47	693.27	13.687		
Falta de ajuste	12	613.42	51.119	59.95	0.06
Error puro	35	29.84	0.583		
Total	52	1975.58			

Fuente: Minitab

9.3.- Relación de costos usados en este trabajo de tesis para la realización de la Matriz de Decisión Multicriterio

En la Tabla 9.16 se mencionan los costos de los reactivos químicos e insumos usados para la evaluación económica de los coagulantes y floculantes evaluados.

Tabla 9.16. Relación de costos de productos químicos e insumos usados en la evaluación económica de los coagulantes y floculantes evaluados

Reactivos químicos e insumos	Costo
Poliamina, FLOQUAT FL3249, marca SNF.	2.67 USD\$/kg
Poliacrilamida, FLOERGER FO 4800SSH, marca SNF.	6.03 USD\$/kg
Ácido sulfúrico concentrado, reactivo analítico, marca Meyer.	12.41 USD\$/L
Cloruro férrico, reactivo analítico, marca Meyer.	100.12 USD\$/kg
Bentonita sódica, reactivo analítico, marca Meyer.	2.73 USD\$/kg
Hidróxido de sodio, solución al 50%, reactivo analítico, marca Meyer.	3.08 USD\$/L
Pencas de nopal.	0.05 USD\$/kg
Gas LP.	0.28 USD\$/m ³
Alcohol etílico desnaturalizado, marca Meyer.	1.00 USD\$/L

9.5.- Artículos de investigación generados producto de este trabajo de tesis

- An eco-innovative solution for reuse of leachate chemical precipitation sludge: application to a sanitary landfill coverage. Waste Management, presentado y en proceso de revisión.
- Stabilized leachate treatment with a natural organic coagulant (*Opuntia ficus* mucilage), compared to ferric chloride and polyamine. Waste Management and Research, presentado y en proceso de revisión.

9.4.- Actividades complementarias desarrolladas en este trabajo de tesis

- Presentación en el “Cuarto Seminario de Ingeniería Ambiental: Agua, Manejo de Aguas Tratadas y Cambio Climático”, el 23 de marzo de 2017, en la Escuela Superior Agraria, del Instituto Politécnico de Beja, en Beja, Portugal. El título de la ponencia fue: “Landfill Leachate Treatment by Coagulation/ Flocculation with Mucilage of the *Opuntia Ficus*”.
- Estancia de Investigación en el Instituto Politécnico de Beja, Beja, Portugal. del 14 de marzo al 11 de junio de 2017. Se desarrolló un proyecto para proponer un reúso de los lodos que resultan del tratamiento de lixiviados por el proceso de coagulación. El reúso propuesto fue como agregado al material de cubierta del relleno sanitario de la Municipalidad de Cuba, Portugal.

9.6.- Código de Ética

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo de tesis es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales".

Alfredo Martínez Cruz