



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA AMBIENTAL - SUSTANCIAS Y RESIDUOS
PELIGROSOS**

**“USO DEL MUCÍLAGO DE NOPAL COMO UNA ALTERNATIVA PARA EL
TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA
HEMODIÁLISIS Y DIÁLISIS”**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

Ing. Guadalupe Ochoa Pastor

TUTOR PRINCIPAL

Dra. Georgina Fernández Villagómez, Facultad de Ingeniería

COMITÉ TUTOR

M.A.I. Landy Irene Ramírez Burgos, Facultad de Química.

Dra. María Neftalí Rojas Valencia, Instituto de Ingeniería.

Ciudad Universitaria, CDMX.

junio, 2021.



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. María Soledad Córdova Aguilar

Secretario: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Vocal 1: M.A.I. Landy Irene Ramírez Burgos

Vocal 2: M. en C. Patricia Romero Mares

Vocal 3: Dra. Georgina Fernández Villagómez

TUTOR DE TESIS

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

.....

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería y a la Dra. Georgina Fernández Villagómez por su confianza y apoyo para realizar esta tesis.

Al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, así también, a la Dra. Marisol Córdova por facilitarme recursos para trabajar, así también al Ing. Abel Blancas por brindarme su apoyo en la extracción de mucilago de nopal.

A la Maestra Natasha Villaseñor que se encuentra en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, por su apoyo en cada situación para poder llevar a cabo mi tesis y por toda la ayuda brindada de Juanita y Claudia, por su enorme labor en la organización del laboratorio.

A las personas que me ayudaron a recolectar y encontrar el efluente de diálisis como la Ing. Fanny Alvarado y a la M. Miriam Arenas por su granito de arena en este proyecto.

También quiero agradecer a Pedro Guadarrama Guzmán y Mayra Guadarrama Guzmán por siempre estar dispuestos ayudarme sin importar la hora

A Instrumentación y Servicio en Analítica por facilitarme los equipos para pruebas que se realizaron en esta tesis y a su ingeniera de servicio Ana Sánchez por enseñarme a usar el FTIR y su paciencia para que yo lo manejara.

DEDICATORIA

A Dios, por esta oportunidad de realizar una meta y verme realizada una vez más.

A mis padres, Elisa y Miguel que son mi apoyo en cada prueba de mi vida. ¡¡Los amo!!

A mi hermana Coni, por ser siempre mi guía, mi compañera, gracias por siempre tener fe en mí, eres un regalo que Dios me trajo.

A Mike por ser mi ariuju, por ayudarme y apoyarme siempre en cada paso que doy, por ser siempre mi protector.

A mis sobrinos, que son mi motor para seguir adelante y decirles: que el amor que tengo por ellos hace que me levante y mejore cada día.

A mi abuelita † que sé que estaría muy orgullosa de este gran paso.

A Paty y Normita por ser un regalo que Dios me ha mandado y siempre ser un ejemplo de vida

A mi madrina y Ana Luz por estar siempre para mí y ser una bendición en mi vida.

A cada uno de mis amigos: Sandy P., Alin H., Bel, Miguelito Salazar, Diana R., Salvador S., Ana Laura, Elisa G., David H., Josafath, Oscar, Laura C., Guillian, David A., Juan E., Adriana A., Dominique, Israel, Lú Z, Cecy Z., Emanuel, Bali, Esaú, Alfredo† por ser parte de mi vida en cada etapa y sueño realizado.

Y por último a mí por superar la prueba y ver que: ¡si se puede!...

Agradezco a los que no logré mencionar, pero saben que los tengo en un rincón de mi corazón y que esta tesis no es solo mía, es un regalo que pude realizar con el apoyo de todos.

Muchas personas consideran una mujer “fuerte”, por ganar todas las batallas, yo agregaría “valiente” porque ha soportado cada una de ellas.

Anónimo

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	10
JUSTIFICACIÓN.....	10
I. OBJETIVOS.....	11
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
III. ALCANCES Y LIMITACIONES	12
IV. HIPÓTESIS	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Generalidades del Mucilago de Nopal	13
2.1.1. Definición, clasificación y características.....	13
2.1.2. Nopal de poda	16
2.1.3. Mucilago de nopal <i>Opuntia</i> sp.	17
2.1.4. Aplicaciones del mucilago de nopal <i>Opuntia</i> sp.	20
2.1.5. Extracción del Mucilago de Nopal.....	21
2.2. Antecedentes de la hemodiálisis y diálisis.....	23
2.2.1. Generalidades de la diálisis	24
2.2.2. Historia de la diálisis.....	24
2.2.3. Funcionamiento del tratamiento de diálisis	24
2.2.4. Generalidades de la hemodiálisis.....	26
2.2.5. Historia de la hemodiálisis.....	26
2.2.6. Funcionamiento del tratamiento de hemodiálisis.....	28
2.2.7. Problemática en los efluentes de diálisis y hemodiálisis	30
2.3. Legislación y normatividad ambiental.....	31
2.4. Tratamiento de aguas residuales “coagulación-floculación”.....	33
2.4.1. Mecanismo de la coagulación - floculación.....	34
2.4.2. Potencial Z	37
2.4.3. Prueba de Jarras	38
2.4.4. Turbidez	39
2.4.5. Coagulantes y floculantes utilizados en el tratamiento de aguas residuales	40
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	46
3.1. Metodología general	46
3.2. Diseño de Experimentos	46
3.2.1. Variable de respuesta.....	48
3.2.2. Arreglo de datos	52
3.3. Extracción del mucilago de nopal de nopal de poda <i>Opuntia</i> sp.....	54

3.3.1. Metodología general para la extracción de mucilago de nopal de poda Opuntia sp.....	54
3.4. Muestreo de los efluentes de diálisis.....	55
3.5. Muestreo de los efluentes de hemodiálisis	58
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
4.1. Caracterización del mucilago de nopal	59
4.2. Caracterización agua de hemodiálisis y diálisis	61
4.3. Análisis de los efluentes de hemodiálisis y diálisis.....	64
4.4. Prueba de Jarras	65
4.4.1. Prueba de jarras para el efluente de diálisis con mucilago de nopal de poda Opuntia sp. del intervalo 5 a 80 mg/L	67
4.4.2. Prueba de jarras para el efluente de diálisis con mucilago de nopal de poda Opuntia sp. del intervalo 5 a 35 mg/L	68
4.4.3. Lodos generados en el tratamiento de diálisis con mucilago de nopal de poda Opuntia sp.	73
4.4.4. Prueba de jarras para el efluente de hemodiálisis con mucilago de nopal de poda Opuntia sp. de 5 a 80 mg/L	75
4.4.5. Prueba de jarras para el efluente de hemodiálisis con mucilago de nopal de poda Opuntia sp. de 5 a 35 mg/L	76
4.4.6. Lodos generados para el tratamiento de hemodiálisis con mucilago de nopal de poda Opuntia sp.....	82
4.4.7. Dosis óptima de mucilago de Opuntia sp. vs ajuste de pH para los efluentes de diálisis y hemodiálisis	83
4.4.8. Prueba de jarras con coagulantes comerciales	84
4.4.9. Prueba de jarras para el efluente de diálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	85
4.4.10. Prueba de jarras para el efluente de diálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	90
4.4.11. Prueba de jarras para el efluente de hemodiálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$...	93
4.4.12. Prueba de jarras para el efluente de hemodiálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	97
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	101
RECOMENDACIONES	103
ANEXOS	104
REFERENCIAS	117

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2. 1 Taxonomía de Opuntia sp.</i>	16
<i>Tabla 2. 2 Composición de mucilago de Opuntia sp.</i>	19
<i>Tabla 2. 3 Aplicaciones mucilago de nopal Opuntia ficus indica</i>	20
<i>Tabla 2. 4 Extracción de mucilago de nopal con solventes y sus relaciones</i>	22
<i>Tabla 2. 5 Solutos presentes en el dializado</i>	25
<i>Tabla 2. 6 Historia de la hemodiálisis</i>	27
<i>Tabla 2. 7 Normatividad para descarga de efluentes hospitalarios</i>	32
<i>Tabla 2. 8 Índice de Willcomb</i>	37
<i>Tabla 2. 9 Coagulantes empleados en el tratamiento de aguas residuales</i>	41
<i>Tabla 2. 10 Ventajas y desventajas de los coagulantes naturales</i>	44
<i>Tabla 2. 11 Ventajas y desventajas de los coagulantes químicos</i>	45
<i>Tabla 3. 1 Trabajos realizados con mucilago en diferentes especies</i>	50
<i>Tabla 3. 2 Coagulantes utilizados en el tratamiento de agua</i>	51
<i>Tabla 3. 3 Aleatorización de dosis en la prueba de jarras para diálisis (5-80 mg/L)</i>	52
<i>Tabla 3. 4 Aleatorización de dosis en la prueba de jarras para hemodiálisis (5-80 mg/L)</i>	52
<i>Tabla 3. 5 Aleatorización de dosis en la prueba de jarras para diálisis (5-35 mg/L)</i>	53
<i>Tabla 3. 6 Aleatorización de dosis en la prueba de jarras para hemodiálisis (5-35 mg/L)</i>	53
<i>Tabla 4. 1 Números de onda de FTIR y compuestos en polvo de Opuntia ficus y mucílago</i>	60
<i>Tabla 4. 2 Resultados de la caracterización del agua residual proveniente de hemodiálisis y diálisis</i>	64
<i>Tabla 4. 3 Parámetros establecidos en la prueba de jarras de acuerdo con la ASTM D2035-08</i>	65
<i>Tabla 4. 4 Resultados de ANOVA para diálisis de 5 a 35 (mg/L)</i>	69
<i>Tabla 4. 5 Resultados de ANOVA para hemodiálisis de 5 a 35 (mg/L)</i>	77
<i>Tabla 4. 6 Comparaciones de tratamiento por pares Tukey</i>	78
<i>Tabla 4. 7 Resultados de ANOVA para diálisis $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i>	89
<i>Tabla 4. 8 Comparaciones de tratamiento por pares Tukey</i>	89
<i>Tabla 4. 9 Resultados de ANOVA para diálisis $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i>	93
<i>Tabla 4. 10 Resultados de ANOVA para hemodiálisis $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i>	97
<i>Tabla 4. 11 Resultados de ANOVA para hemodiálisis $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i>	99
<i>Tabla 4. 12 Comparaciones de dosis en cada tratamiento</i>	100

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2. 1 Producción de Nopal en la República Mexicana, elaboración propia</i>	14
<i>Figura 2. 2 Producción agrícola de nopal por estado</i>	15
<i>Figura 2. 3 Participación agrícola de nopal por estado</i>	15
<i>Figura 2. 4 Milpa Alta Opuntia ficus indica</i>	17
<i>Figura 2. 5 Representaciones esquemáticas de azúcares encontrados en el mucilago de Opuntia sp.</i>	18
<i>Figura 2. 6 Estructura del mucilago de nopal</i>	18
<i>Figura 2. 7 Diagrama del circuito de hemodiálisis</i>	30
<i>Figura 2. 8 Proceso de coagulación y floculación</i>	34
<i>Figura 2. 9 Fases de la coagulación</i>	35
<i>Figura 2. 10 Prueba de Jarras</i>	39
<i>Figura 2. 11 Representación esquemática de la estructura del ácido poligalacturónico</i>	43
<i>Figura 3. 1 Metodología experimental</i>	46
<i>Figura 3. 2 Procedimiento para cada efluente</i>	48
<i>Figura 3. 3 Cladodios de nopal de poda. Lote 1 (Milpa Alta)</i>	54
<i>Figura 3. 4 Procedimiento de extracción de mucilago de nopal de poda</i>	55
<i>Figura 3. 5 Procedimiento de eliminación para el efluente de diálisis</i>	56
<i>Figura 3. 6 Muestreo de efluente de diálisis</i>	57
<i>Figura 3. 7 Muestreo de efluente de hemodiálisis</i>	58
<i>Figura 4. 1 IR Mucilago de nopal de poda</i>	59
<i>Figura 4. 2 FTIR Shimadzu con ATR</i>	61
<i>Figura 4. 3 IR de efluente hospitalario proveniente de hemodiálisis</i>	62
<i>Figura 4. 4 IR de efluente hospitalario proveniente de diálisis</i>	63
<i>Figura 4. 5 Prueba de jarras en Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental</i>	66
<i>Figura 4. 6 Resultados de remoción de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5-80 mg/L)</i>	67
<i>Figura 4. 7 Resultados de remoción de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)</i>	68
<i>Figura 4. 8 Vista frontal de los flóculos con el efluente de diálisis</i>	69
<i>Figura 4. 9 Resultados de pH de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)</i>	70
<i>Figura 4. 10 Resultados de conductividad eléctrica de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)</i>	71
<i>Figura 4. 11 Resultados de sólidos disueltos de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)</i>	71
<i>Figura 4. 12 Resultados de demanda química de oxígeno de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)</i>	72
<i>Figura 4. 13 Vista frontal del clarificado del efluente de diálisis</i>	73
<i>Figura 4. 14 Lodos generados de la prueba de jarras "diálisis"</i>	73
<i>Figura 4. 15 IR de los lodos provenientes del tratamiento de diálisis</i>	74
<i>Figura 4. 16 Resultados de remoción de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5-80 mg/L)</i>	75
<i>Figura 4. 17 Vista en planta de flóculos en prueba de jarras</i>	76
<i>Figura 4. 18 Resultados de remoción de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)</i>	76
<i>Figura 4. 19 Resultados de pH de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)</i>	79
<i>Figura 4. 20 Resultados de conductividad eléctrica de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)</i>	80
<i>Figura 4. 21 Resultados de sólidos disueltos de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)</i>	81
<i>Figura 4. 22 Resultados de demanda química de oxígeno de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)</i>	82

<i>Figura 4. 23 Efluente de diálisis “pH vs % de remoción de turbiedad”</i>	83
<i>Figura 4. 24 Efluente de hemodiálisis “pH vs % de remoción de turbiedad”</i>	84
<i>Figura 4. 25 Prueba de Jarras con coagulante químico. Elaboración propia</i>	85
<i>Figura 4. 26 Resultados de pH para efluente de hemodiálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i>	86
<i>Figura 4. 27 Resultados de DQO para efluente de hemodiálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i>	87
<i>Figura 4. 28 Resultados de % de remoción de turbiedad para efluente de hemodiálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i>	88
<i>Figura 4. 29 Resultados de turbiedad para efluente de hemodiálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i>	88
<i>Figura 4. 30 Resultados de pH para el efluente de diálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i>	90
<i>Figura 4. 31 Resultados de DQO para el efluente de diálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i>	91
<i>Figura 4. 32 Resultados de % de remoción para el efluente de diálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i>	92
<i>Figura 4. 33 Resultados de turbiedad para el efluente de diálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i>	92
<i>Figura 4. 34 Resultados de pH para el efluente de diálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i>	94
<i>Figura 4. 35 Resultados de DQO para el efluente de diálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i>	95
<i>Figura 4. 36 Resultados de % de remoción de turbiedad para el efluente de diálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i> ...	95
<i>Figura 4. 37 Resultados de turbiedad para el efluente de diálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$</i>	96
<i>Figura 4. 38 Resultados de pH para el efluente de hemodiálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i>	97
<i>Figura 4. 39 Resultados de DQO para el efluente de hemodiálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i>	98
<i>Figura 4. 40 Resultados de % de remoción de turbiedad para el efluente de hemodiálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i> ..	98
<i>Figura 4. 41 Resultados de turbiedad para el efluente de hemodiálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$</i>	99

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

JUSTIFICACIÓN

Los efluentes hospitalarios pueden contener sustancias peligrosas, como residuos farmacéuticos, sustancias químicas, toxinas y patógenos; estas sustancias logran representar un riesgo químico, biológico y físico para la salud pública y ambiental. El agua residual generada por la hemodiálisis y diálisis es descargada al drenaje con niveles superiores a los permisibles a los establecidos por la normatividad. Se sabe que la insuficiencia renal afecta al 10% de la población mundial (OPS, 2015) y se estima que, en 2025, esta enfermedad afectará aproximadamente a 4 millones de pacientes (Chaguay, 2017; Machado *et al.*, 2014; Carraro *et al.*, 2016).

El consumo anual de agua potable para una persona saludable es de 1,000 litros por año, mientras que, un paciente con tratamiento de hemodiálisis consume 37,334 litros y un paciente de diálisis llega a requerir 78,000 litros, por lo que la cantidad de agua consumida para estos tratamientos es mayor a la requerida por una persona saludable. Una de las alternativas para el tratamiento de los efluentes mencionados es el mucílago de nopal de poda *Opuntia sp.*, el cual es un polisacárido que tiene alta capacidad de coagulación y es un residuo en la práctica agrícola mexicana, además, sus lodos son altamente biodegradables y su generación es baja. (Urzu *et al.*, 2006; Aliaga, Aceituno y Sa, 2007; Yin, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011; Ahuja, 2013; Elena y Gazabón, 2013; Buttice, Alcantar y Florida, 2014; Nawel *et al.*, 2015; Nharingo y Moyo, 2016; Oladoja, 2016).

I. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de mucílago del nopal como una alternativa para el tratamiento del agua residual proveniente de la hemodiálisis y diálisis, a nivel laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el estado del arte para la extracción de mucilago de nopal (*Opuntia sp.*) de acuerdo con lo publicado al siglo XXI.
- Investigar la peligrosidad del efluente proveniente del proceso de hemodiálisis y el de diálisis caracterizando las muestras proporcionadas por dos diferentes hospitales y considerando la normativa mexicana NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002.
- Determinar la dosis de coagulante natural (mucilago de nopal de *Opuntia sp.*) con ayuda de un floculante para el tratamiento de agua generada en el proceso de hemodiálisis y diálisis, utilizando el método de prueba de jarras (ASTM D2035-08) basándose en un diseño de experimentos.
- Evaluar las eficiencias de remoción del coagulante natural y coagulantes comerciales utilizando un diseño estadístico de experimentos para cada uno.

III. ALCANCES Y LIMITACIONES

- ❖ El agua residual proveniente de hemodiálisis y diálisis procede de dos diferentes hospitales, ubicados en la Ciudad de México.
- ❖ La composición del agua de hemodiálisis y diálisis no fue homogénea, ya que ésta depende de la edad y alimentación del paciente, por lo que los resultados que aporta esta investigación son puntuales.
- ❖ El mucilago de nopal fue proporcionado por el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- ❖ Para este proyecto solo se utilizó nopal de poda "*Opuntia sp.*", debido a que no tiene un valor nutricional y es un residuo en la práctica agrícola.
- ❖ El diseño estadístico que se utilizó para este proyecto fue el diseño completamente al azar para cada efluente, tanto para encontrar la dosis óptima de mucilago de nopal *Opuntia sp.* y coagulantes químicos como el sulfato de aluminio y cloruro férrico.

IV. HIPÓTESIS

El mucilago de nopal por su capacidad de coagulación permitirá cumplir las condiciones de descarga del agua de hemodiálisis y diálisis para disposición en la red de alcantarillado.

El coagulante natural "mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.*" reducirá la producción de lodos a diferencia del coagulante comercial.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades del Mucilago de Nopal

El mucílago de nopal *Opuntia sp.* es un polisacárido fibroso, altamente ramificado, cuyo peso molecular oscila alrededor de 13×10^6 kg/kgmol, con un gran potencial debido a su abundancia, ubicación, rápido crecimiento, bajo costo y por su alta capacidad de coagulación aportando en la eliminación de sedimentos y bacterias en el tratamiento de aguas residuales, además sus lodos son altamente biodegradables (Yin, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011; Ahuja, 2013; Elena y Gazabón, 2013; Buttice, Alcantar y Florida, 2014; Nharingo y Moyo, 2016; Oladoja, 2016).

2.1.1. Definición, clasificación y características

Opuntia sp. mejor conocido como “Nopal” es el nombre mexicano derivado del náhuatl *Nopalli*, el cual es usado para varias especies y *Tenochtli* es el nombre original usado en muchos lugares de México.

El nopal crece en regiones áridas y semiáridas de México, actualmente la producción de nopal está distribuida en varios estados principalmente: Morelos, Ciudad de México, Estado de México, San Luis Potosí, Zacatecas y Tamaulipas como se aprecia en la figura 2.1 (Urzu *et al.*, 2006; C. Yin, 2010; Sáenz, 2018).



Figura 2. 1 Producción de Nopal en la República Mexicana, elaboración propia

Fuente: Urzu *et al.*, 2006; Yin, 2010; Sáenz, 2018.

En la figura 2.2 y 2.3 se observan los datos de la producción de nopal, entre los estados más importantes se encuentran: Morelos con el 39%, Ciudad de México en la localidad de Milpa Alta que representa el 20% y Coahuila con el 12% de la producción nacional de acuerdo con los datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP ,2018).

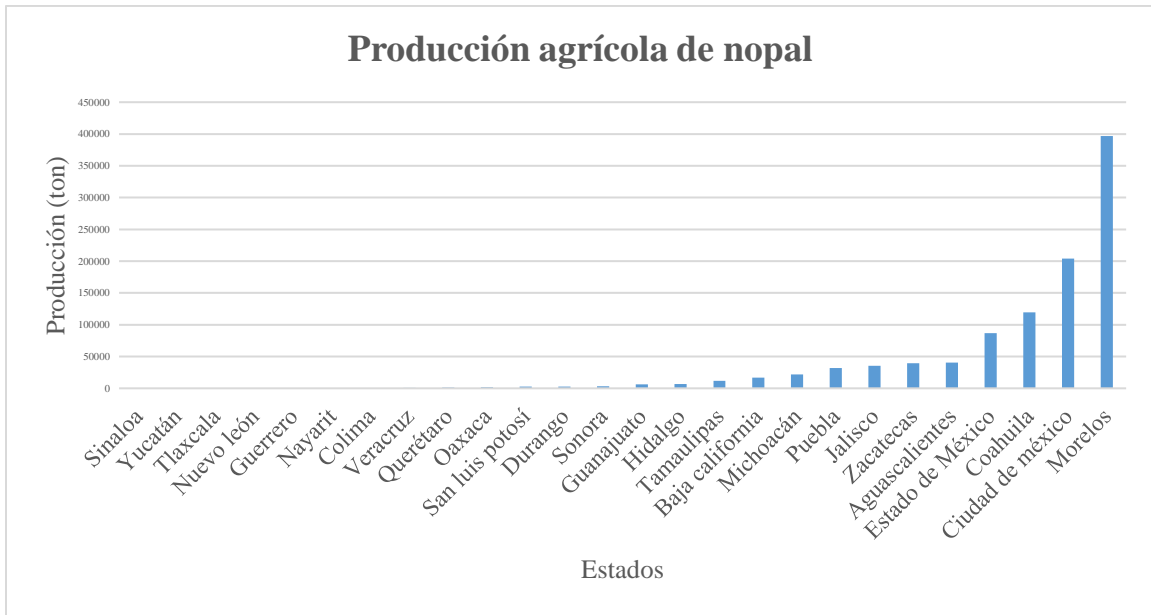


Figura 2. 2 Producción agrícola de nopal por estado

Fuente: Adaptado del SIAP, 2018.

Los estados con menor producción son: Michoacán, Puebla, Zacatecas y Aguascalientes como se pueden visualizar en la figura 2.3.



Figura 2. 3 Participación agrícola de nopal por estado

Fuente: Adaptado del SIAP, 2018.

Entre las especies de nopal más frecuentes se encuentran: *O. ficus-indica*, *O. amyclacea* y *O. robusta* var. *Larreyi* (Rzedowski, 2005), el género *Opuntia* es de los más adecuados para el cultivo ya que pueden soportar las condiciones de escasez de agua, altas temperaturas y suelos pobres (Aliaga, Aceituno y Sa, 2007; Torres, Carpinteyro y Vaca, 2012).

Tabla 2. 1 Taxonomía de *Opuntia* sp.

Nombre común	Nopal
Nombre botánico	<i>Opuntia</i> sp.
Reino	Plantae
Orden	Caryophyllales
Familia	Cactaceae

Fuente: (Nharingo y Moyo, 2016).

Los cladodios (almohadillas) son tallos modificados aplanados que van entre 60 a 70 cm de longitud y con un grosor de 2 a 3 cm. El grosor depende de la edad, agua y los nutrientes recibidos durante el crecimiento. Contiene una epidermis con dos capas, una de células de color verde conocida como “clorénquima” y otra que forma un cilindro de células blancas y cuya función principal es el almacenamiento de agua que es conocida como “parénquima”. Dentro de los tejidos de ambas capas hay células que almacenan el mucílago (Urzu *et al.*, 2006; Aliaga, Aceituno y Sa, 2007).

2.1.2. Nopal de poda

El “nopal de poda” es un desecho que se obtiene de la práctica agrícola realizada por algunos productores de tuna en México. Esta técnica se aplica en el nopal desde que la planta inicia la germinación, su objetivo es mejorar la calidad del fruto, productividad, rentabilidad, control de tamaño de la planta para lograr una buena forma y así facilitar la cosecha; además favorece la detección, control de plagas, enfermedades y, por lo tanto, asegura la intercepción del máximo de radiación fotosintética por los cladodios terminales dando lugar a la formación de la planta como un seto; este procedimiento es importante para moderar el crecimiento de las plantas a un espacio que permita, primero llevar a cabo el control mecánico de la maleza; y segundo, facilitar la cosecha dentro una planta y entre plantas (Martínez *et al.*, 2001;

Vázquez *et al.*, 2012). Si no se poda, la actividad fotosintética y la eficiencia productiva de la planta disminuyen (Sáenz, 2018).

Este proceso se realiza generalmente en el mes de diciembre y existen dos formas para realizar dicho trabajo: el despunte, que consiste en eliminar un porcentaje de la rama o crecimiento anual, y el aclareo, que es eliminar el crecimiento desde su base. (Martínez *et al.*, 2001). Como resultado el productor tiene un alto volumen y peso de material podado que pueden ser usados como forraje, aunque la literatura menciona que el uso de este residuo no es recomendable porque muchas de ellas serán pencas viejas, sombreadas, parasitadas por insectos. No deben dejarse tiradas dentro de la plantación ya que los insectos que estén dentro de ellas pueden completar su ciclo biológico en la penca cortada y pasar nuevamente a las plantas, por lo que se deben considerar más usos y disposición final de este desecho (Vázquez *et al.*, 2012).

2.1.3. Mucilago de nopal *Opuntia sp.*

Los principales componentes de los cladodios son polímeros que contienen carbohidratos, ya que son una mezcla de mucilago y pectina (Sáenz, 2018). El mucilago de nopal produce propiedades únicas de superficie activa en el agua, que le dan la capacidad de precipitar partículas e iones de soluciones acuosas (Nawel *et al.*, 2015).



Figura 2. 4 Milpa Alta *Opuntia ficus indica*

El mucílago extraído de los cladodios de *Opuntia sp.*, contiene sustancias poliméricas complejas, básicamente ácido galacturónico muy similar a la estructura de la pectina, más los residuos de algunos azúcares con una estructura ramificada que contiene dos fracciones solubles en agua con propiedades gelificantes y sin gelificar (Olivero Verbe *et al.*, 2014). Contienen L -arabinosa, D- galactosa, L- ramnosa y D -xilosa, así como ácido galacturónico (Urzu *et al.*, 2006; Aliaga, Aceituno y Sa, 2007; C. Yin, 2010; Torres, Carpinteyro-urban y Vaca, 2012; Nawel *et al.*, 2015).

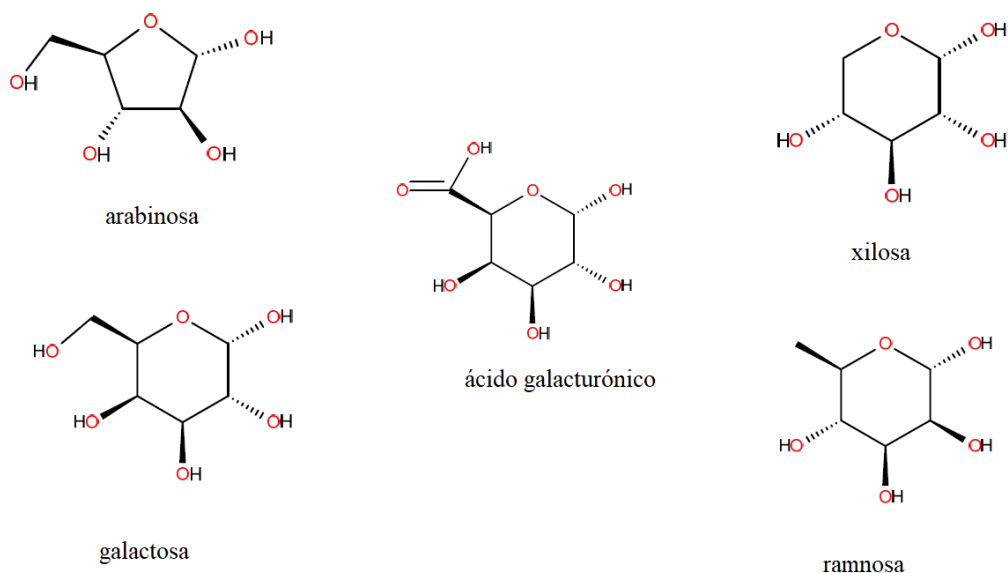


Figura 2. 5 Representaciones esquemáticas de azúcares encontrados en el mucílago de *Opuntia sp.*

Fuente: Fox, 2011.

Goycoolea y Cárdenas (2003) definieron la estructura del mucílago de nopal que se aprecia en la figura 2.6.

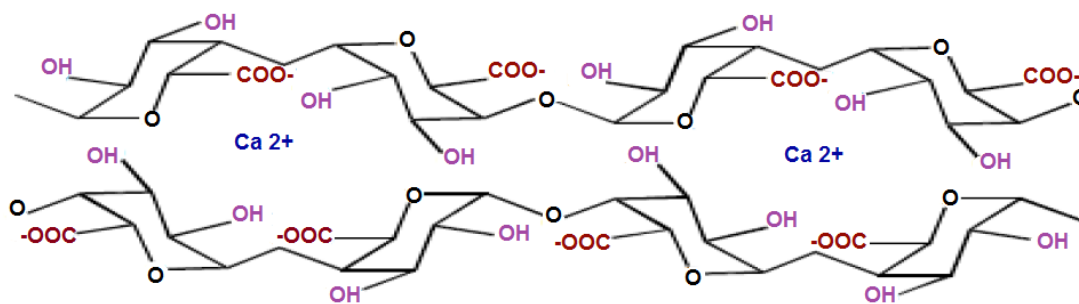


Figura 2. 6 Estructura del mucilago de nopal

Fuente: Cruz, 2017.

Fox, 2011 y Rodríguez *et al.*, 2014. reportan algunas composiciones de mucílago que se presentan en la siguiente tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Composición de mucilago de *Opuntia* sp.

Fuente	Composición (%)
McGarvie y Parolis, 1981.	Galactosa 18.4, arabinosa 42.4, xilosa 24.5, ramnosa 6.4, ácido galacturónico 8.4
Paulsen y Lund, 1979.	Azúcares con diferentes proporciones
Saag y col., 1975.	Azúcares similares en otras especies de <i>Opuntia</i> .
Amin y col.,1970.	Arabinosa 37.5, galactosa 35.7, xilosa 15.5, ramnosa 11.5
Fox, 2011.	Arabinosa 24.38, galactosa 14.66, xilosa 10.8
Pichler, Young y Alcantar, 2012.	Arabinosa 67.3, galactosa 6.3, ramnosa 5.4, xilosa 20.4
Trachtenberg y Mayer, 1981.	Arabinosa 24.6, galactosa 40.1, ramnosa 13.1, xilosa 22.2
Nobel <i>et al.</i> 1992.	Arabinosa 42, galactosa 21, ramnosa 7, xilosa 22
Medina-Torres <i>et al.</i>, 2000.	Arabinosa 46.68, galactosa 17.92, ramnosa 6.76, xilosa 23.45
Rodríguez-González <i>et al.</i>, 2014.	Arabinosa 35.36, galactosa 27.26, ramnosa 1.93, xilosa 16.32
Goycoolea y Cárdenas, 2003.	Arabinosa 3.06, galactosa 20.99, ramnosa 1.75, xilosa 17.93
Medina-torres <i>et al.</i>, 2000.	Arabinosa 44.04, galactosa 20.43, ramnosa 7.02, xilosa 22.13

2.1.4. Aplicaciones del mucilago de nopal *Opuntia sp.*

Algunas de sus aplicaciones se describen en la tabla 2.3, en donde se puede visualizar que Sáenz (2018), encuentra varias aplicaciones en la industria de alimentos, mientras que Yin (2010), Nawel (2015), Buttice (2014) y Torres (2012) encontraron la aplicación en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de sedimentos y turbidez.

Tabla 2. 3 Aplicaciones mucilago de nopal *Opuntia ficus indica*

Aplicación	Autor
Aditivos para dar viscosidad	Sáenz, 2018.
Bebidas	
Pudines	
Aderezos	
Cobertura comestible para proteger frutas frescas	
Biogás	
Actividad antimicrobiana para reducción de metales	Nawel <i>et al.</i> , 2015, Buttice, Alcantar y Florida, 2014.
Eliminación de turbidez	
Coagulación-Floculación	
Tratamiento de agua	Torres, Carpinteyro-Urban y Vaca, 2012.
Forraje	Abraján, 2008.
Conservación del suelo	
Procesamiento de alimentos	
Repelente de insectos	
Fruta	
Hortaliza	
Actividad antimicrobiana	Nharingo y Moyo, 2016,
Reducción de metales como As, Cd, Cu, Fe	

El uso del mucilago de nopal tiene algunas ventajas como su efectividad, abundancia, accesibilidad y bajo costo. En el tratamiento de aguas residuales poseen un gran potencial para mejorar la calidad del agua, lo que significa un menor riesgo a la salud. Así también, los lodos producidos, se generan en menor volumen y mejor biodegradabilidad (Torres, Carpinteyro-urban and Vaca, 2012; Buttice, Alcantar and Florida, 2014; Mukhtar, Ali and Hussain, 2015).

2.1.5. Extracción del Mucilago de Nopal

Existen diversas formas de extraer el mucilago de nopal, entre los más comunes es utilizar agua y precipitar con algún solvente como puede ser: etanol, alcohol isopropílico, alcohol etílico y acetona, y otro de los métodos es por compresión (Medina-torres *et al.*, 2000; Aliaga, Aceituno y Sa, 2007; Cai, 2008; Yahia, Ornelas y Anaya, 2009; Guevara-figueroa *et al.*, 2010).

La extracción con agua es la opción más aceptada debido a su abundancia y rentabilidad, cabe destacar que los residuos que se utilizan durante el proceso son biodegradables por lo que su descarga puede ir directamente al drenaje (C. Yin, 2010).

En la tabla 2.4 se presentan en resumen los diferentes tipos de solventes, principalmente alcoholes y sus relaciones con agua que se han utilizado para la extracción de mucilago de nopal.

Tabla 2. 4 Extracción de mucilago de nopal con solventes y sus relaciones

Tipo de solvente	**Rel. almohadilla/ agua	**Rel. alcohol/agua	Autor
etanol y alcohol isopropílico	1:7	1:3 y 1:4	(Aliaga, Aceituno y Sa, 2007)
etanol	1:7	1:3	(Dominguez et al., 2011)
éter de petróleo	1:1	--	(Majdoub et al., 2001)
etanol	--	1: 5	(Urzu et al., 2006)
etanol	1:4	1:3	(Mendoza et al., 2014)
acetona	1:5	1:3	(Abraján, 2008)
etanol y alcohol isopropílico	1:1	1:2	(Aquino et al., 2009)
etanol	1:2.5	1:6	(Vargas Rodríguez et al., 2016)
alcohol isopropílico	--	--	(Ixtafiayuca, 2012)
Alcohol etílico	1:1	1:3	(Cruz, 2017)

** Rel. = Relación (volumen/volumen)

Sepúlveda, Saenz y Aliaga, 2007, reportan la extracción del mucílago, que consiste en triturar las almohadillas de nopal, homogeneizar con agua en proporción 1: 5 y 1: 7, filtrar con un paño fino y centrifugar. Para reducir la cantidad de alcohol en la solución de mucílago precipitan con etanol y alcohol isopropílico y se dejan secar en un horno a 70°C, así también Majdoub *et al.*, 2001, mencionan un procedimiento similar, solo que las muestras de nopales son peladas, trituradas y mezcladas usando una licuadora, para posteriormente adicionar éter de petróleo bajo agitación mecánica a temperatura ambiente, para su filtración al vacío.

El método de interés para este trabajo es el que reporta Reyes-Ocampo *et al.*, 2019, llamado “*filtración simple*” que se refiere a filtrar a vacío, además, en este mismo trabajo se reportan dos métodos aunque con menores rendimientos que son “*filtración-concentración*”, que consiste en filtrar, concentrar en un evaporador de vacío rotatorio y finalmente el “*filtrado-clarificación-concentración*” en este método, la muestra se filtra y se concentra, para posteriormente añadir polvo de carbón activado a la solución y filtrar al vacío.

Es importante resaltar que los rendimientos son bajos ($\leq 2\%$ peso fresco), pero se considera un procedimiento interesante dado que los cladodios o pencas se pueden obtener como residuos de poda y llegan a estar disponibles todo el año (Sáenz, 2018), colaborando así con el aprovechamiento de residuos de otros procesos.

2.2. Antecedentes de la hemodiálisis y diálisis

Los riñones, además de eliminar desechos y líquido innecesario también producen hormonas y equilibran las sustancias químicas del cuerpo. Cuando los riñones dejan de funcionar, se le conoce como Insuficiencia Renal, que es caracterizada por la disminución progresiva e irreversible de la función del riñón por un periodo superior a tres meses, por lo que es necesario iniciar con la diálisis (NIDDK, 2007).

En la enfermedad renal crónica produce deterioro de la calidad de vida de los pacientes, que está relacionada con factores demográficos como edad, sexo, o las enfermedades que la causan (hipertensión, diabetes, lupus, etc.) o con el propio deterioro de la función renal (López *et al.*, 2017).

En México existen alrededor de 140,000 pacientes con Insuficiencia Renal Crónica (IRC), de los cuales 65 mil están en tratamiento (FMR, 2012), esta enfermedad afecta al 10% (OPS, 2015) y se ubica en el 12° lugar a nivel mundial, representando el 1.4% del total de decesos (Arce Moguel *et al.*, 2018).

Se espera que en 2025, esta enfermedad afecte aproximadamente 4 millones de pacientes, por lo que la cantidad de aguas residuales producidas por las instalaciones de diálisis y hemodiálisis incrementen considerablemente (Machado *et al.*, 2014).

El agua residual se genera en grandes volúmenes en el tratamiento de hemodiálisis y diálisis, por lo que representan un impacto sobre la salud pública y ambiente, cuya magnitud ha comenzado a evaluarse en los últimos años (Paz *et al.*, 2012).

2.2.1. Generalidades de la diálisis

La palabra diálisis viene del griego *Dyalisis* que significa disolución, es el paso de moléculas en solución por difusión a través de una membrana semipermeable (Becerra, 2013). La NOM-171-SSA1-1998, define a la diálisis peritoneal como el procedimiento terapéutico especializado que utiliza la difusión pasiva a través de la membrana peritoneal.

Es un proceso fisicoquímico aplicado en la medicina para depurar sustancias del torrente circulatorio. Puede emplearse tanto en pacientes con falla renal aguda como en pacientes con insuficiencia renal crónica, para su tratamiento existen diferentes métodos: la diálisis peritoneal y la hemodiálisis (Yeun y Depner, 2005; Ávila-Palomares, López-Cervantes y Durán-Arenas, 2010).

2.2.2. Historia de la diálisis

La diálisis fue acuñada en 1861 Thomas Graham que es considerado el “padre de la diálisis moderna”, fue el primero en descubrir la difusión de gases, enunció la ley de los gases, investigó la fuerza osmótica y la separación de las sustancias mediante membranas. Fue capaz de extraer urea de la orina e inventó el proceso fundamental de separación de solutos usando membranas semipermeables *in vitro* (Yeun y Depner, 2005; Basri, 2014).

2.2.3. Funcionamiento del tratamiento de diálisis

La diálisis peritoneal remueve las sustancias de desecho de la sangre y consiste en una bolsa con líquido de diálisis (dializado) conectada a un catéter, con el que se introduce el líquido a la cavidad abdominal, en donde el peritoneo se desempeña como una membrana semipermeable que permite la difusión de sustancias entre el plasma sanguíneo y el líquido de diálisis. El dializado se deja allí durante algún tiempo para que pueda absorber los productos de desecho, una vez terminado el proceso de difusión, éste es drenado fuera del cuerpo y es depositado en una bolsa de drenaje y los desechos son eliminados (Ávila-Palomares, López-Cervantes y Durán-Arenas, 2010). Este intercambio, o ciclo, se repite varias veces durante el día, su proceso ocurre a través de la ósmosis, ya que la solución de diálisis tiene una alta concentración de glucosa y da como resultado una presión osmótica que hace que el líquido pase de la sangre al dializado (Basri, 2014).

La preparación del dializado y la composición son críticos para el éxito de la diálisis. En la tabla 2.5 se mencionan algunos solutos presentes en el dializado.

Tabla 2. 5 Solutos presentes en el dializado

Componente	Concentración (mEq/L)
Sodio	135 - 145
Potasio	0 - 4
Cloruro	102 - 106
Bicarbonato	30 - 39
Acetato	2 - 4
Calcio	0 -3.5
Magnesio	0.5 -1.1
Dextrosa	11
pH	7.1-7.3

Fuente: (Yeun y Depner, 2005)

El tratamiento de diálisis peritoneal se realiza en el hogar o en hospitales. Aunque la diálisis peritoneal no es tan eficiente como la hemodiálisis, ya que en el primero se realiza por un período más largo (Basri, 2014).

2.2.4. Generalidades de la hemodiálisis

La NOM-171-SSA1-1998, define a la hemodiálisis, como el procedimiento terapéutico especializado que utiliza la difusión pasiva a través de una membrana artificial semipermeable.

La hemodiálisis significa "diálisis de la sangre". Esta forma de diálisis se distingue por su ubicación fuera del cuerpo y por el flujo continuo de sangre a través del dializador. La hemodiálisis terapéutica se usa con mayor frecuencia para tratar la insuficiencia renal donde se añaden solutos al dializado a concentraciones diseñadas para imitar aquellas que normalmente son las principales en la sangre por el riñón nativo (Yeun y Depner, 2005).

La hemodiálisis permite extraer los productos tóxicos generados por el organismo que se han acumulado en la sangre (Sánchez, Zavala y Pérez, 2012), es el método más común para tratar la insuficiencia renal avanzada y permanente (NIDDK, 2007). Consiste en bombear sangre heparinizada y líquido de diálisis a través de un circuito extracorpóreo para difundir sustancias a través de una membrana semipermeable (Becerra, 2013).

El agua residual de la hemodiálisis depende de la duración de la sesión y frecuencia de tratamiento, utiliza más de 80 litros por sesión y la máquina para realizar este procedimiento puede llegar a tratar de 6 a 10 pacientes (Agar, 2012).

2.2.5. Historia de la hemodiálisis

Como se mencionó anteriormente el profesor de química Graham en Escocia, acuñó el término de diálisis. Posteriormente en Alemania, Georg Haas fue el primero en utilizar el riñón artificial para dializar un humano en 1924 (Yeun y Depner, 2005).

En 1943, Kolff conocido como el "*padre de hemodiálisis*" porque su método fue aceptado como el estándar para el reemplazo temporal de la función renal en pacientes con insuficiencia renal aguda, después el trabajo de Hass que mejora este procedimiento con la

invención del celofán, el descubrimiento de antibióticos y la disponibilidad de heparina como un anticoagulante (Yeun y Depner, 2005).

En 1960, Scribner, Quinton y Dillard en la Universidad de Washington en Seattle desarrollaron un dispositivo de acceso a la sangre para diálisis repetida utilizando tubos de plástico insertados en la arteria y vena, conocido como la derivación Scribner, y el más utilizado que son las fístulas arteriovenosas (AV), introducidas posteriormente por Brescia y Cimino que permitió que la hemodiálisis se repitiera durante muchos años (Yeun and Depner, 2005).

A continuación, se presenta la tabla 2.6 con información más detallada sobre la historia de la hemodiálisis la cual inicio en el siglo XIX (Becerra, 2013).

Tabla 2. 6 Historia de la hemodiálisis

Aportación	Año
Graham T. "Principio de la diálisis"	1854
Abel JJ. Primera diálisis in vivo en perros	1913
Hass G. Primera hemodiálisis en humanos	1923
Thalhimer W. Primera diálisis y celofán " riñón artificial"	1938
Kolff WA. Dializador " tambor rotatorio"	1943
Quinton y Scribner "Fistula arteriovenosa externa para diálisis regular"	1960
Cole "sistema de diálisis sin bomba"	1960
Merrill JP y Shaldon S. "Hemodiálisis en domicilio"	1964

Fuente: (Becerra, 2013).

2.2.6. Funcionamiento del tratamiento de hemodiálisis

Para realizar la hemodiálisis se debe preparar un acceso vascular en un área del cuerpo donde se insertan dos agujas antes de cada sesión para permitir que la sangre fluya a través de una aguja desde su acceso vascular hasta la máquina y luego desde la máquina hasta el cuerpo, esto se debe realizar semanas o meses antes de iniciar con el procedimiento.

Los tipos de acceso vascular son (AKF, 2019):

- 1) Fístula arteriovenosa (AV) que es una conexión entre una arteria y una vena, se realiza con mayor frecuencia en el brazo no dominante y este acceso se realiza de dos a tres meses antes de la hemodiálisis.
- 2) Injerto arteriovenosa (AV), utiliza un tubo de plástico para conectar la arteria y la vena dentro del cuerpo y requiere de dos o tres semanas antes iniciar el proceso. En este procedimiento las probabilidades de infecciones y coágulos de sangre son más altas.
- 3) Catéter venoso que consiste en insertar el tubo en una vena en el cuello, pecho o pierna. Este tipo de acceso puede ocasionar problemas de infección, coágulos de sangre y cicatrices, por lo que se debe usar por lapsos breves.

El aparato para la diálisis tiene como función principal bombear la sangre, vigilar el flujo, filtrar los desechos de la sangre, controlar la presión arterial y la velocidad de la eliminación de líquido del cuerpo y los mecanismos por los cuales se realiza este procedimiento son: difusión y convección (ultrafiltración) (Becerra, 2013).

Para la hemodiálisis la solución debe prepararse a partir de agua tratada adecuadamente, los componentes principales del proceso de la hemodiálisis son (Becerra, 2013; AKF, 2019; NIDDK, 2007):

- a) *dializador* que se basa en un dispositivo que filtra la sangre a través de una membrana semipermeable; es un recipiente grande que contiene pequeñas fibras a través de las cuales fluye la sangre. Las fibras permiten que los desechos y los líquidos innecesarios pasen de la sangre hacia la solución,

b) *líquido de diálisis* ayuda a eliminar los desechos y el líquido innecesario de la sangre, contiene sustancias químicas que actúan como una esponja, su concentración se ajusta dependiendo del tratamiento y análisis de sangre y por último,

c) *sistema de transporte* que está comprendido por una bomba que se localiza en la máquina, un circuito a través del cual se transporta la sangre hacia el filtro y el acceso vascular.

Los tipos de hemodiálisis son: hemodiálisis hospitalaria, auto hemodiálisis, hemodiálisis en casa, hemodiálisis diaria, hemodiálisis lenta, hemodiálisis corta, hemodiálisis larga, hemodiálisis nocturna, hemodiálisis con ultrafiltración (hemodiafiltración), hemodiálisis combinada con diálisis peritoneal, hemodiálisis portátil y hemodiálisis en centro (Becerra, 2013). En la hemodiálisis, la mayoría de los pacientes van a una clínica tres veces a la semana durante 3 a 5 horas en cada visita (NIDDK, 2007).

La figura 2.7 muestra la máquina de hemodiálisis, que realiza el trabajo que hacían los riñones cuando estaban sanos; hace una limpieza en la sangre, en un inicio la sangre viaja a través de tubos para su filtración, este elimina los desechos y una vez limpia la sangre regresa al cuerpo.

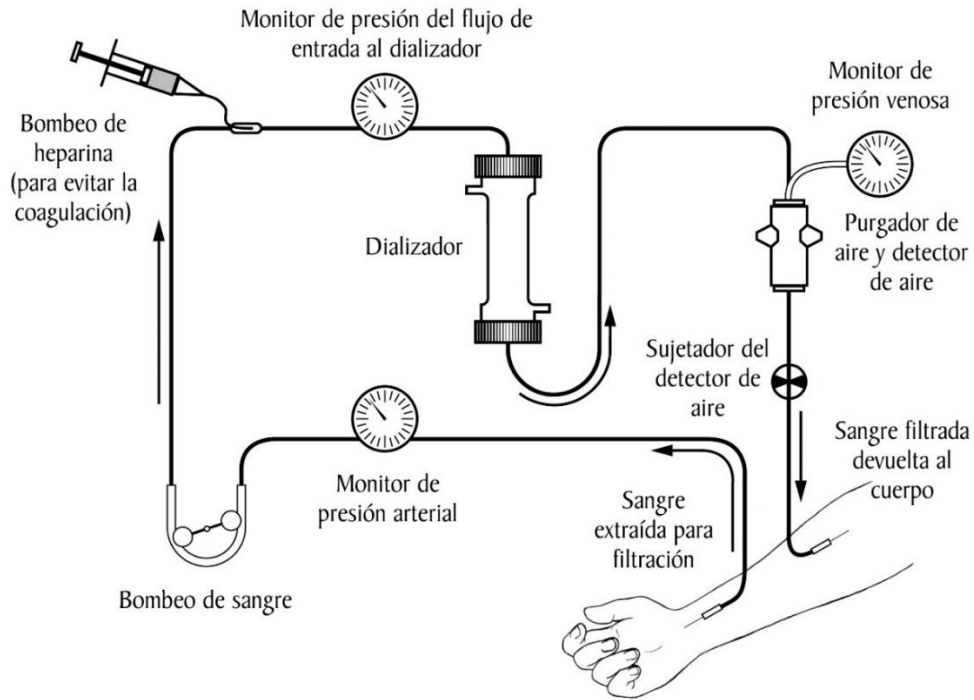


Figura 2. 7 Diagrama del circuito de hemodiálisis

Fuente: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases (2018).

2.2.7. Problemática en los efluentes de diálisis y hemodiálisis

En México generalmente se prescribe la diálisis peritoneal como primera instancia, pero si el paciente presentara alguna complicación, se evalúa la posibilidad de prescribir hemodiálisis para continuar con el tratamiento (Ávila *et. al*, 2010).

La población de diálisis que actualmente se estima es aproximadamente 2 millones de pacientes en todo el mundo y un servicio mundial de diálisis usa aproximadamente 156 mil millones de litros de agua. Se estima que en la hemodiálisis el consumo anual de agua para un sistema que funciona 12 horas al día y 6 días a la semana es de 112, 000 litros, mientras que una persona saludable puede consumir de 500 a 1,000 litros de agua por año (Tarrass, Benjelloun y Benjelloun, 2008; Ángeles *et al.*, 2011; Machado *et al.*, 2014). Los efluentes derivados del proceso de diálisis y hemodiálisis se descargan al drenaje con niveles superiores a los permisibles para su descarga (Water UK, 2011).

Los efluentes hospitalarios pueden contener sustancias peligrosas, como residuos farmacéuticos, sustancias químicas, toxinas, enterobacterias y agentes patógenos entéricos. Debido a estas sustancias, el agua residual de los hospitales puede representar un riesgo químico, biológico y físico para la salud pública y ambiental, entre la que destaca el agua residual generadas por la hemodiálisis y diálisis, que puede tener un impacto significativo en el ambiente debido a su alta conductividad y salinidad por lo que se considera un residuo biológico infeccioso, debido a su contenido de toxinas y bacterias, por lo que es necesario un tratamiento adecuado para su descarga (Machado *et al.*, 2014; Akin, 2016; Rajasulochana y Preethy, 2016; Cuevas-Budhart *et al.*, 2019).

Existen pocos estudios reportados como Latorre Segovia, 2012; Chaguay, 2017; Machado *et al.*, 2014 donde se han realizado tratamientos y análisis para los efluentes hemodiálisis y diálisis y, se ha visto la necesidad de algunas alternativas que sean amigables con el ambiente.

2.3. Legislación y normatividad ambiental

Algunos países consideran que los efluentes hospitalarios son domésticos y, por lo tanto, se descargan directamente al drenaje sin ningún tratamiento previo que pueden llegar a superar los límites máximos permisibles (Carraro *et al.*, 2016). En la tabla 2.7 se muestran algunos países que regulan la descarga de efluentes hospitalarios, aunque en México existió la norma NOM-CCA-029 ECOL/1993, no ha sido renovada.

Se puede observar que el intervalo de pH va desde 5 a 10, mientras que solo España e Italia regulan la temperatura; por otro lado, la DBO₅ y DQO varían desde 0 hasta arriba de 1000 mg/L y únicamente Italia y México consideran la relación de DBO₅/DQO; la conductividad eléctrica si está regulada por España y finalmente, la India toma en cuenta el nitrógeno amoniacal.

Tabla 2. 7 Normatividad para descarga de efluentes hospitalarios

País	México	Italia	España	China	Brasil	India
Normatividad	<i>NOM-CCA-029 ECOL/19 93</i>	<i>DPR n. 227/201 1</i>	<i>Decreto 57/2005</i>	<i>National Standard of the People's Republic of China. (GB8978-88) 1998</i>	<i>Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA, 2011 n° 430</i>	<i>The Bio Medical Waste Management and Handling Rules 1998 S.O.630(E), [20/ 7/1998]</i>
pH	6 a 9	5.5. a 9.5	6 a 10	6 a 9	6 a 9	5.5. a 9
Temperatura (°C)	-	≤30	≤40	--	≤40	-
DBO₅ (mg/L)	40	≤300	≤1000	0 a 300	120	<350
DQO (mg/L)	80	≤700	≤1750	0 a 500	125	<250
DQO/DBO₅	2	≤2.2	-	-	--	-
Conductividad Eléctrica (mS/cm²)	-	-	≤7500	-	--	-
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	-	-	-	-	20	≤50

2.4. Tratamiento de aguas residuales “coagulación-floculación”

Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas, con peso específico superior al del agua, llamadas “flóculos”. Es el método más importante para la remoción de partículas coloidales y suspendidas, además de reducir la turbidez, la coagulación parcialmente remueve el color verdadero y aparente, bacterias (80 a 90%), virus, organismos patógenos susceptibles a ser separados, eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos (Lorenzo, 2006).

La coagulación es un proceso donde los coloides suspendidos en el agua se desestabilizan después de disminuir sus cargas superficiales mediante la adición de sustancias con una carga opuesta y la aplicación de energía de mezclado; luego, las partículas desestabilizadas se aglomeran generando el asentamiento. El propósito de la coagulación es reducir el *potencial zeta* por adición de iones específicos e inducir la desestabilización de las partículas para aglomerarlas (Flórez *et al.*, 2011). Para realizar la coagulación se requiere de una mezcla de alta energía llamada “mezcla rápida”, entre el agua y el coagulante para proporcionar el contacto con las partículas en suspensión, lo que provoca la desestabilización de las partículas y permite que se desarrollen los flóculos (Yin, 2010; Wei *et al.*, 2018).

En el proceso de floculación, las partículas se hacen más grandes y permiten que estas se desestabilicen y aglomeren (Aguilar, 2002), pueden eliminarse por gravedad a través de sedimentación. La energía debe ser lo suficientemente baja como para permitir la mezcla y contacto de partículas, sin proporcionar tanta energía ya que las partículas son delicadas y pueden llegar a separarse y no sedimentar (Flórez *et al.*, 2011; Johnson, 2014; Wei *et al.*, 2018).

El proceso de coagulación y floculación se ejemplifica a continuación en la figura 2.8 (Casiday, 2019).

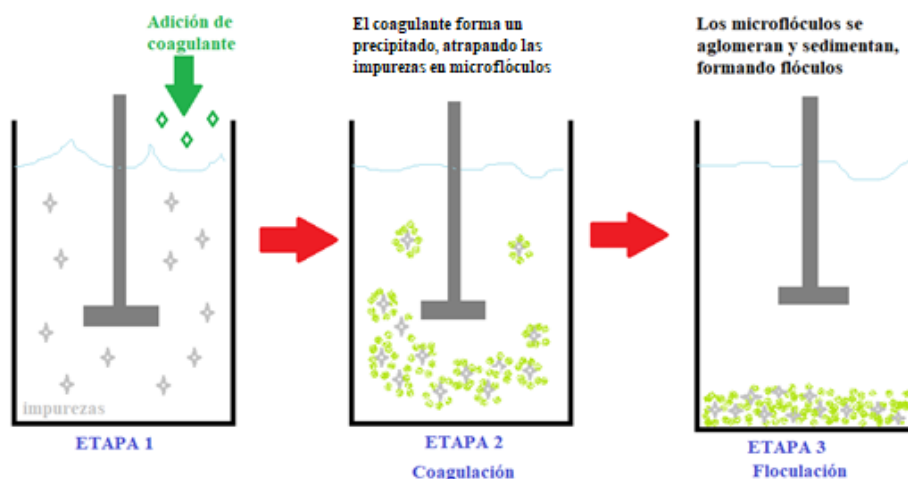


Figura 2. 8 Proceso de coagulación y floculación

Fuente: Casiday R., 2019.

En el tratamiento de aguas residuales, como es la coagulación- floculación se obtienen “lodos”, su contenido es generalmente inferior al 8% antes del tratamiento. Los componentes del lodo incluyen principalmente agua y varios tipos de sólidos dependiendo los componentes que contenga el agua residual que se está tratando (Wei *et al.*, 2018)

2.4.1. Mecanismo de la coagulación - floculación

Las partículas coloidales en el agua están generalmente cargadas negativamente, debido a la presencia de grupos COO^- y OH^- , la carga negativa en la superficie causa repulsión entre las partículas, evitando la aglomeración y formación de partículas más grandes que podrían sedimentar más fácil, se deben reemplazar mediante la adición de iones cargados positivamente. Entonces, se rompe la repulsión electrostática entre las partículas coloidales y se produce la aglomeración mediante fuerzas de Van der Waals (Vargas y Romero, 2006).

Este proceso de desestabilización de partículas coloidales se llama coagulación y es llevada a cabo por la adición de un agente químico conocido como coagulante. Una vez

desestabilizadas las partículas, estas experimentan el proceso de floculación, al aglomerarse para formar microflóculos y más tarde flóculos, que pueden sedimentarse fácilmente. En este punto, también se puede agregar otro agente químico llamado floculante, que promueve la formación de flóculos (Vargas y Romero, 2006).

La formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras. Puede ser causada por la colisión entre las partículas, debido a que se acercan lo suficiente a las superficies sólidas (Acosta, 2006).

Las fases de coagulación surgen en un tiempo muy corto, es decir, es instantáneo presentándose en las siguientes etapas que se muestran en la figura 2.9:

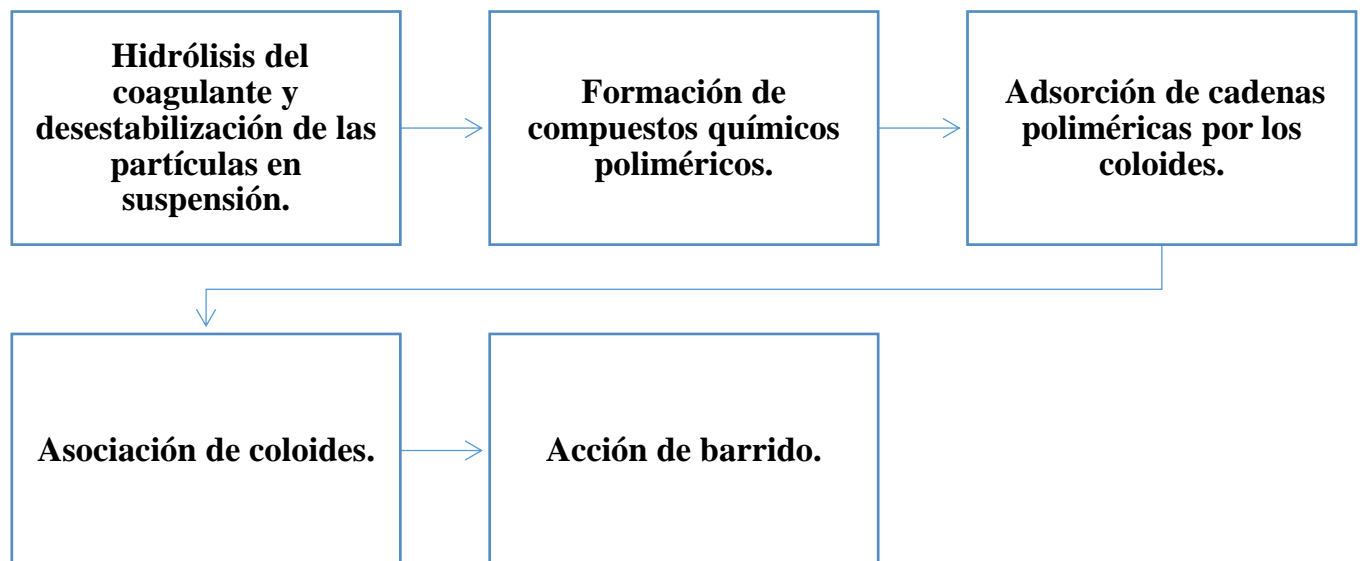


Figura 2. 9 Fases de la coagulación

Fuente: Cárdenas et al., 2000; Lorenzo, 2006

C. Yin (2010) explica los tipos de coagulación clásicos, en las cuáles se da la agregación de partículas en una solución que pueden ocurrir y son:

- **Compresión de doble capa:** La presencia coagulante puede causar la compresión de la doble capa que desestabiliza las partículas.

- **Barrido de floculación:** Ocurre cuando un coagulante encapsula partículas suspendidas en un flóculo coloidal suave. Se presenta cuando el agua es clara, es decir, que presenta baja turbiedad y la cantidad de partículas coloides es pequeña.
- **Adsorción y neutralización de carga:** Se refieren a la sorción de dos partículas con iones con carga opuesta.
- **Adsorción y puente entre partículas:** Generalmente se presenta cuando un coagulante proporciona una cadena polimérica que absorbe las partículas.

Existen dos fases de la floculación que son (Cárdenas *et al.*, 2000; Foldeny, 2007):

- **Pericinética:** Es producido por el movimiento natural de las moléculas del agua (movimiento Browniano) y esta inducida por la energía térmica, las partículas colisionan y permanecen juntas mientras se mueven generando una actividad caótica, de tal forma que crecen a un tamaño más grande y dejan de ser afectadas por el movimiento.
- **Ortocinética:** Se mueven juntas bajo la influencia de la acción del agua. La resistencia depende de su tamaño, forma y compactación, naturaleza de las micropartículas y forma de los ligamentos que unen las partículas. Cuando el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos.

Se produce primero la floculación pericinética y posteriormente se presenta la floculación ortocinética.

La calidad y tamaño de los flóculos es importante para poder calificar la formación más consistente y rápida de sedimentar, existe el índice de Willcomb, el cual se presenta a continuación en la tabla 2.8:

Tabla 2. 8 Índice de Willcomb

# índice	Descripción
0	Floculo coloidal: Ningún signo de aglutinación
2	Visible: Flóculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso: Flóculo bien formado, pero uniformemente distribuido. Sedimenta muy lentamente o no sedimenta.
6	Claro: Flóculo de tamaño relativamente grande, pero precipita con lentitud.
8	Bueno: Flóculo que se deposita fácil pero no completamente.
10	Excelente: Flóculo que se deposita completamente dejando el agua cristalina

Adaptado de (Giordani, Gonzáles y Morales, 2008; Lorenzo, 2006).

2.4.2. Potencial Z

Es una medida de la estabilidad de una partícula y se define como la potencia electrostática que existe entre la separación de las capas que rodean a la partícula (Foldeny, 2007).

Su medición es importante ya que, si se añade demasiado coagulante, la superficie de la partícula se cargará positivamente y la partícula volverá a dispersarse, entre mayor es el potencial Z, mayor es la fuerza de repulsión entre coloides y más estable es la suspensión coloidal. Si la partícula no experimenta movimiento, es porque el potencial Z vale cero, a este punto se le conoce con el nombre de "punto isoeléctrico" y es aquí, en este punto, donde se produce la mejor floculación, al evitarse el equilibrio de fuerzas que impiden que estas partículas coloidales continúen en suspensión. El potencial Z de los coloides depende del pH óptimo de coagulación que será el existente cuando se alcanza el punto isoeléctrico (Lorenzo Acosta, 2006).

Como el potencial zeta se aproxima a cero, las fuerzas repulsivas disminuyen y las partículas pueden aglomerarse en partículas de flóculo más grandes que son más susceptibles de clarificación y filtración (Johnson, 2014).

2.4.3. Prueba de Jarras

La prueba de jarra es la técnica para determinar la dosificación óptima del coagulante, en ella se trata de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel laboratorio, para garantizar condiciones de coagulación adecuadas para un tratamiento efectivo (Johnson, 2014).

En este proceso influyen factores como (Lorenzo, 2006; Wei *et al.*, 2018; Cabrera, 2009):

1. pH: Controla la especiación y la solubilidad del coagulante y puede afectar la especiación de contaminantes.
2. Temperatura: Afecta la viscosidad del agua y la solubilidad del coagulante, es decir, si se tienen temperaturas más bajas pueden disminuir la cinética de hidrólisis y precipitación. Según disminuye la temperatura del agua debe aumentarse la dosis de productos químicos usados para coagular, con el objetivo de lograr o asegurar la formación de flóculos adecuados.
3. Concentración de coagulante: Dosis insuficientes de coagulante no desestabilizará las partículas, mientras que la dosificación excesiva puede resultar altos volúmenes de lodos.
4. Secuencia de aplicación de las sustancias químicas
5. Grado de agitación
6. Tiempo de sedimentación

Para evaluar los resultados de una prueba de jarras se observan las características de los flóculos como el tamaño, uniformidad, velocidad de aparición, si son densos, livianos y difusos, apenas puntos o microflóculos, también la calidad del sobrenadante si el agua es clara o transparente, la velocidad de sedimentación de los flóculos (Lorenzo Acosta, 2006).

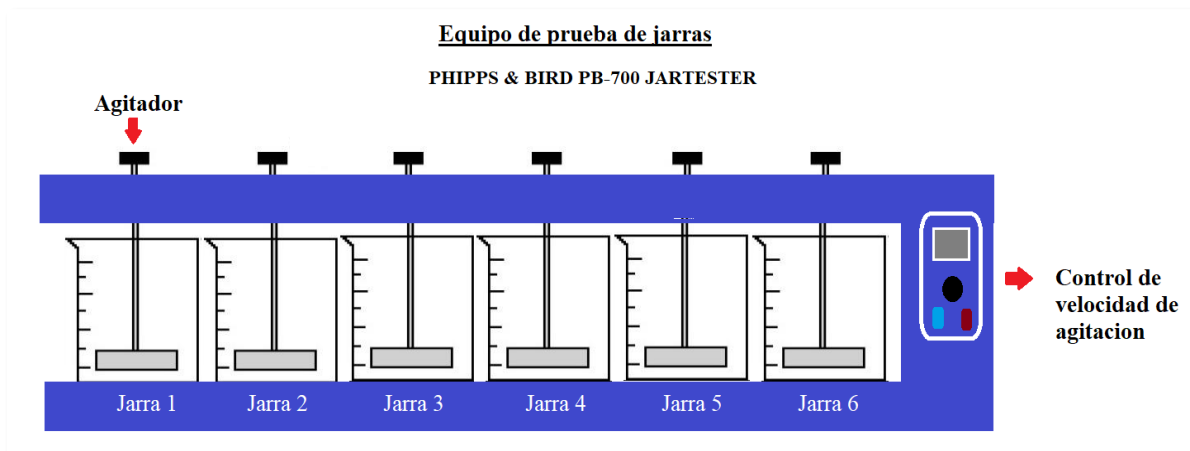


Figura 2. 10 Prueba de Jarras

Fuente: Cruz, 2017.

2.4.4. Turbidez

La turbidez es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. Puede ser medida con un turbidímetro y su unidad es medida en (NTU) unidad nefelométrica de turbidez. Es definida "como la obstrucción óptica de la luz, causada por una parte por millón de sílice en agua destilada" (Cabrera, 2009; Flórez *et al.*, 2011).

La turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas, con tamaños de partícula coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia (Cabrera, 2009).

Se evalúa la turbidez como parámetro de respuesta para la coagulación-floculación, pudiendo evaluarse el por ciento de remoción, por la ecuación que se expresa a continuación Flórez *et al.*, 2011:

$$\% \text{ remoción} = \left(\frac{\text{turbiedad inicial} - \text{turbiedad final}}{\text{turbiedad inicial}} \right) * 100$$

2.4.5. Coagulantes y floculantes utilizados en el tratamiento de aguas residuales

Los coagulantes ayudan a reducir las fuerzas que mantienen estable a la materia suspendida, coloidal y disuelta, a fin de fomentar aglomerados que sean removidos del agua por la acción de la gravedad. Los coagulantes más comunes que se usan en el tratamiento de aguas residuales son: compuestos inorgánicos de aluminio o hierro como el sulfato de aluminio, sulfato ferroso y cloruro férrico. Cada coagulante tiene un rango específico de pH donde tiene la mínima solubilidad y ocurre la máxima precipitación, también, de las características químicas del agua (Flórez *et al.*, 2011).

Los compuestos que normalmente se utilizan se pueden apreciar en la tabla 2.9

Tabla 2. 9 Coagulantes empleados en el tratamiento de aguas residuales

Coagulantes	Fórmula química	Observaciones
Sulfato de Aluminio	$Al_2(SO_4)_3$	Coagulante primario, pH de 5.5 a 7.5.
Aluminato de Sodio	$NaAlO_2$	Se usa con el sulfato de aluminio, controla el pH y alcalinidad
Cloruro de Aluminio	$AlCl_3$	Se usa mezclado con polímeros orgánicos
Cloruro Férrico	$FeCl_3$	Coagulante primario, pH de 8.0 a 11.0
Sulfato Férrico	$Fe_2(SO_4)_3$	Coagulante primario
Polielectrolitos	Polímeros	Coagulante primario
Alumbre de amonio	$Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4) SO_4 \cdot 24H_2O$	<i>*No aplica</i>
Caparrosa	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	<i>*No aplica</i>

Fuente: (Vargas Camareno y Romero Esquivel, 2006; Foldeny, 2007; Rivas, Menés y Rómulo, 2017)

Los floculantes son polímeros que favorecen el proceso de formación de flóculos, actuando de puentes para captar las partículas en suspensión. Existen tres tipos de floculantes, los aniónicos, los catiónicos y no iónicos.

Los aniónicos se utilizan en la sedimentación de partículas minerales; los catiónicos en la sedimentación de partículas de origen orgánico y los no iónicos en la sedimentación de partículas tanto orgánicas como inorgánicas. Su selección depende del pH de la solución donde se aplique favoreciendo la coagulación, por ejemplo la cal, es usada para aportar la alcalinidad (Rivas, Menés and Rómulo, 2017).

2.4.6. Coagulantes naturales

El uso de coagulantes naturales extraídos de plantas, para el tratamiento de aguas residuales o agua potable, se utiliza desde hace varios milenios, y se han hecho estudios que permiten identificar la potencialidad de distintas plantas que permitan disminuir el uso de sustancias químicas sintéticas, por lo que los coagulantes poliméricos naturales han atraído una atención significativa como coagulantes ecológicos, así como la producción de lodos biodegradables, generando cantidades que van entre el 20-30 % mucho menores a las generadas por el empleo de agentes coagulantes metálicos, como el alumbre. Estos coagulantes pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos, generalmente llamados *polielectrolitos* (Vargas Camareno and Romero Esquivel, 2006; Bouatay and Mhenni, 2014; Ramírez Arcila and Jaramillo Peralta, 2016; Choque-Quispe *et al.*, 2018)

Un polímero se denomina *polielectrolito* cuando su unidad monomérica contiene grupos ionizables; se caracterizan por su carga, densidad y peso molecular, son eficientes para desestabilizar las partículas de lodo a través de la neutralización de la carga, se usan más comúnmente para la eliminación de materia orgánica natural (C. Yin, 2010; Johnson, 2014; Wei *et al.*, 2018).

Los polímeros naturales a base de polisacárido que consisten en anillos de azúcar hexagonales tienen una estructura de varilla rígida, con estructuras que pueden dar lugar a buenas afinidades, contienen grupos funcionales catiónicos y aniónicos, tienen una mejor solubilidad y resistencia en un amplio rango de pH (Wei *et al.*, 2018).

De acuerdo con Saleem y Bachmann (2019) los coagulantes de origen vegetal se clasifican en: catiónicos, aniónicos, poliónicos (anfolitos o anfóteros) y no iónicos (neutros), en el caso del mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.* puede ser un coagulante de tipo aniónico o neutral. Los coagulantes aniónicos se denominan moléculas poliméricas que poseen cargas negativas, tal es el caso del ácido poligalacturónico que es aniónico debido a la desprotonación parcial del grupo funcional carboxílico.

Así también se ha mencionado por Yin (2010), que el ácido galacturónico desempeña un papel clave en la coagulación, ya que es un polielectrolito aniónico y las siguientes reacciones pueden ocurrir:



Donde, R- representa la estructura del ácido galacturónico, para la ecuación (2.1) el grupo carboxilo del ácido galacturónico, se disocia parcialmente proporcionando el grupo COO^- que actúa como un sitio de adsorción química para los cationes.

En la forma polimérica del ácido galacturónico, la cantidad de sitios de adsorción de COO^- disponibles se ve afectada por la concentración de OH^- en la solución, como se observa en la ecuación (2.2).

A un pH superior a 7, la concentración de OH^- aumenta e interrumpe el equilibrio de iones en la solución que desplaza el equilibrio hacia la izquierda y permite que más protones del grupo carboxilo formen moléculas de agua y exponga más sitios de adsorción de COO^- .

En la figura 2.11 el mecanismo donde las partículas en solución no contactan directamente con uno u otro, pero están unidos a un material similar a un polímero. El ácido galacturónico proporciona un "puente" para que las partículas se adsorban, interacciones moleculares dominantes asociadas con la adsorción (Saleem and Bachmann, 2019).

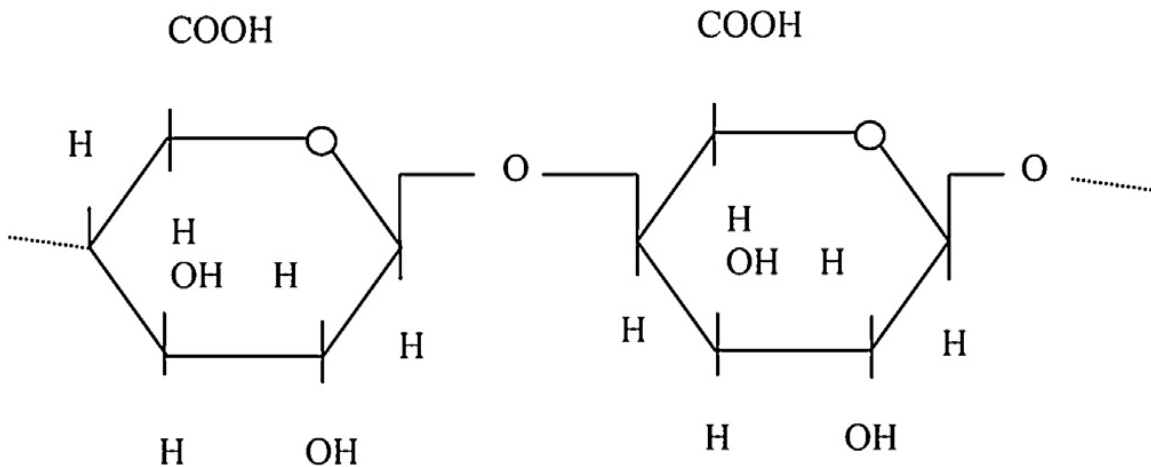


Figura 2. 11 Representación esquemática de la estructura del ácido poligalacturónico

Fuente: (Saleem and Bachmann, 2019)

2.4.7. Ventajas y desventajas de coagulantes naturales y químicos

En la tabla 2.10, se presentan algunas ventajas y desventajas de los coagulantes naturales y químicos, se puede observar que tienen una amplia disponibilidad en el mercado, pero tienen alta producción de lodos, en cambio, en los coagulantes naturales la producción de lodos son biodegradables en comparación a los coagulantes químicos (Yin, 2010; Deshmukh y Hedao, 2018; Wei *et al.*, 2018; Saleem y Bachmann, 2019).

Tabla 2. 10 Ventajas y desventajas de los coagulantes naturales

COAGULANTES NATURALES	
Ventajas	Desventajas
Rentabilidad	Poca información sobre sus propiedades
Biodegradabilidad en los lodos	
Rápido crecimiento	Baja densidad de carga
Bajo costo	
Abundancia	Bajos rendimientos de extracción
Química verde	
Evita la descomposición de los compuestos y la formación de subproductos tóxicos	Peso molecular pequeño
Se requieren bajas dosis	
Cultivarse localmente	Escasa solubilidad en agua
Menor volumen de lodos	
Ahorros de costos de hasta 25-30%	

Fuente: Adaptado de: (Bolto, 2006; C. Yin, 2010; Deshmukh y Hedao, 2018; Wei *et al.*, 2018; Saleem y Bachmann, 2019).

Tabla 2. 11 Ventajas y desventajas de los coagulantes químicos

COAGULANTES QUÍMICOS	
Ventajas	Desventajas
Comerciales	Ineficacia en agua a baja temperatura
Alta producción	Costos de adquisición relativamente altos
	Efectos perjudiciales para la salud humana
Coagulantes más usados	Producción de grandes volúmenes de lodos que no pueden ser utilizados como biosólidos porque impactan negativamente a los suelos y agua por su ecotoxicidad; además provoca riesgos en la salud humana
Altas remociones de contaminantes	Afectan el ecosistema por su pH y conductividad del agua del agua tratada
Costo	Alto nivel de aluminio residual en el sulfato se ha relacionado con varios trastornos médicos incluyendo osteomalacia, síndrome de encefalopatía de diálisis y enfermedad de Alzheimer e insuficiencia renal
Buenos resultados frente a aguas residuales	Altas dosis generan grandes volúmenes de lodo
Disponibilidad	Efectos nocivos sobre la salud humana
Puede alcanzar 90-99% de eliminación microbiana en condiciones óptimas	Se requiere un muy buen control del pH para su coagulación
	La remoción del material orgánico no es óptima

Fuente: Adaptado de: (Howe, 1965; C. Yin, 2010; Olivero Verbe *et al.*, 2014; Choque-Quispe *et al.*, 2018; Deshmukh y M. N. Hedao, 2018; Wei *et al.*, 2018; Saleem y Bachmann, 2019)

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Metodología general

La metodología general para el trabajo propuesto, inicio con la revisión y búsqueda de información sobre extracción de mucilago de nopal, tratamiento de agua con coagulantes naturales, así también el tratamiento de agua con coagulantes químicos, en la siguiente figura 3.1 se muestran los pasos que se realizaron para el presente trabajo.

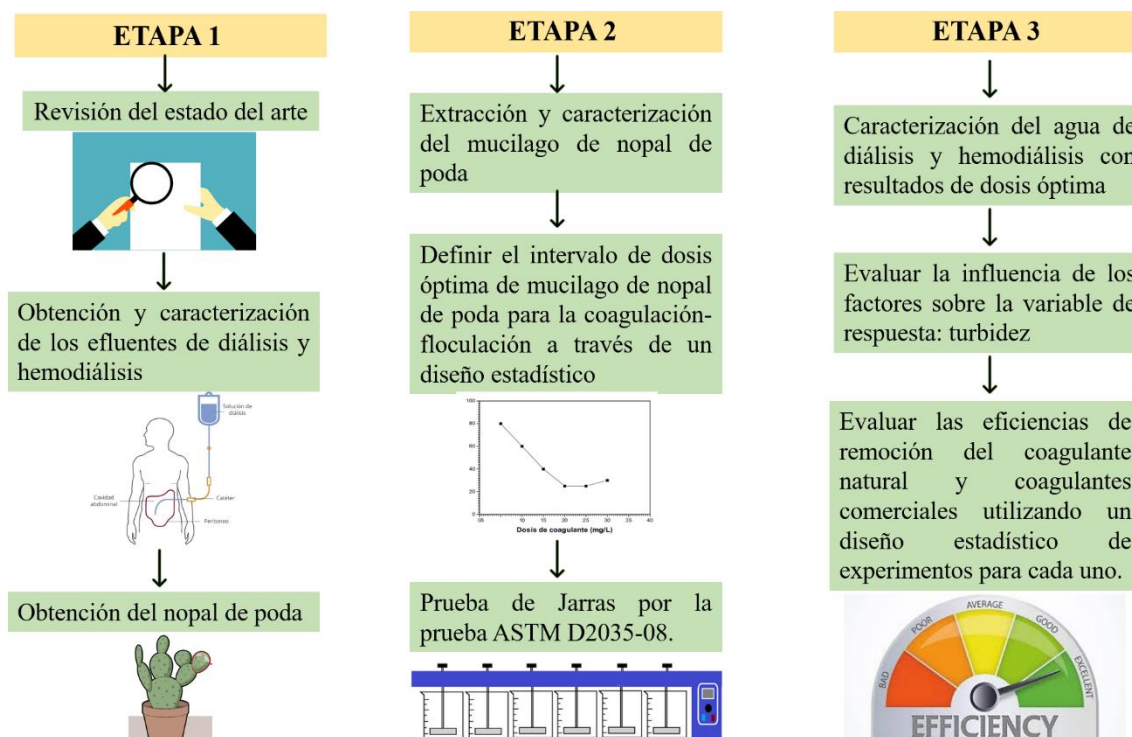


Figura 3. 1 Metodología experimental

3.2. Diseño de Experimentos

El diseño estadístico que se adapta mejor al experimento consiste en un diseño “completamente al azar”, para el cual se considera como único factor la dosis de mucilago de nopal. Se investigó la comparación del efecto de un factor y se estableció el rango de dosis

a utilizar que es de interés para el tratamiento de dos tipos de aguas residuales que son provenientes de diálisis y hemodiálisis.

El estudio que se realizó consistió primeramente en investigar la dosis óptima de mucilago de nopal, tanto del efluente de diálisis como el de hemodiálisis, así también, para el cloruro de hierro y sulfato de aluminio para ambos tipos de agua.

Para el diseño completamente al azar, es porque todas las corridas experimentales se realizan en orden aleatorio completo. De esta manera, si durante el estudio se hacen un cierto número de pruebas, éstas se corren al azar, de manera que los posibles efectos ambientales y temporales se vayan repartiendo equitativamente entre los tratamientos (Gutiérrez *et. al*, 2012).

El diseño completamente al azar (DCA), se utiliza para comparar dos o más tratamientos, en este diseño existen dos fuentes de variabilidad: la del error aleatorio y la de los tratamientos (Gutiérrez *et. al*, 2012).

El modelo estadístico está dado por:

$$y_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij} \cdot \begin{cases} i = 1,2,3,4,5,6 \\ j = 1,2,3 \end{cases}$$

donde,

y_{ij} es la observación de la j -ésima unidad experimental, del i -ésimo tratamiento,

μ_i es la media del i -ésimo tratamiento,

ϵ_{ij} es el error experimental de la unidad ij .

La hipótesis nula por comprobar es que no hay efecto en las dosis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$$

La hipótesis alternativa es que por lo menos hay una dosis que si tiene efecto:

$$H_a: \mu_i \neq \mu_k$$

$$i \neq k$$

para alguna i diferente de k

La hipótesis para probar es que la respuesta de la media poblacional lograda en cada uno de los tratamientos es la misma para los 6 tratamientos.

3.2.1. Variable de respuesta

La variable de respuesta con el mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.* es la “*remoción de turbiedad*”; se consultó literatura reportada por autores que utilizaron mucilago de varias especies para considerar las dosis a utilizar y verificar cuál es la dosis óptima.

En el caso de los coagulantes químicos la variable de respuesta es la “*turbiedad*”, debido a que existen remociones negativas, es decir, que el coagulante en algunos casos aumentaba la turbiedad. Las mediciones que se tomaron en cuenta son: turbiedad, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos.

En la figura 3.2, se observan los experimentos realizados en esta investigación, en total fueron 6 experimentos, en los que se logra apreciar que para cada efluente se realizaron las corridas de prueba de jarras para dosis óptima con mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.*, cloruro de hierro ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y por último sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

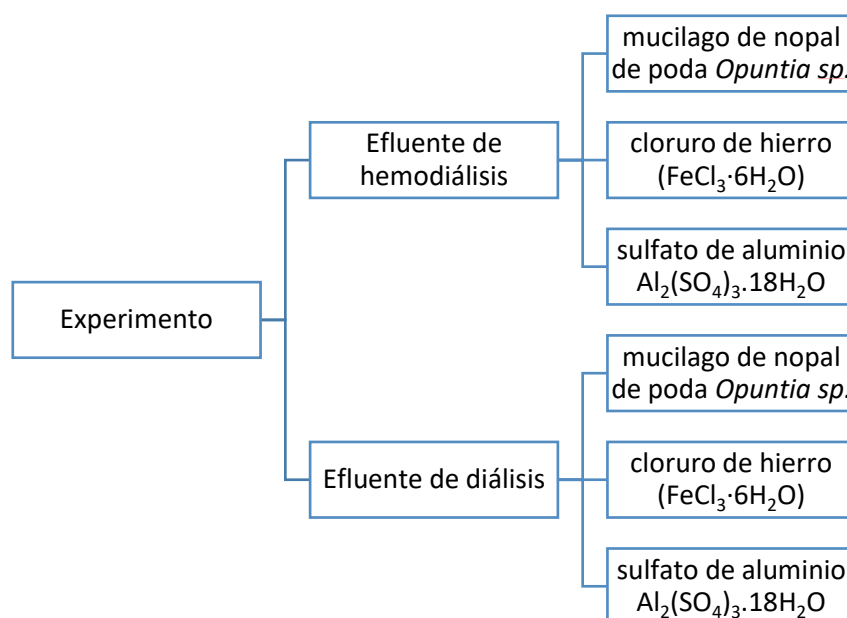


Figura 3. 2 Procedimiento para cada efluente

En la tabla 3.1 se encuentra la información de trabajos realizados con mucilago de diferentes especies, donde se observa el tipo de agua, especie, dosis óptima y eficiencia, aunque no todos reportan esta última. Dado que hasta la fecha no se encontró información que reporte el tratamiento de efluentes de diálisis y hemodiálisis con mucilago de nopal.

Para determinar la dosis de coagulante, es decir, cloruro de hierro ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, se hizo una investigación para el tratamiento de diferentes tipos de agua y establecer el rango de dosis que se aprecia en la tabla 3.2. El diseño estadístico que se utilizó fue el de completamente al azar al igual que para el tratamiento con mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.*

Al finalizar las corridas con cada efluente, se realizó una comparación descriptiva por separado y se evaluó la mejor dosis para cada tipo de efluente y su coagulante.

Tabla 3. 1 Trabajos realizados con mucilago en diferentes especies

Agua (tipo)	Especie	Turbidez inicial (UNT)	Eficiencia de remoción (%)	Dosis óptima mg/L	Referencia
Agua residual	<i>Cactaceous opuntia</i>	176	94	50 – 60	(Zhang <i>et al.</i> , 2006)
Agua sintética	<i>Opuntia</i> spp.	125	92-99	5-55	(Miller, 2008)
Agua de río (residual)	<i>Opuntia stricta cladodes</i>	105	85	10	(Mukhtar, Ali y Hussain, 2015)
Agua residual (sintética)	<i>Cactus lefaria</i>	30	80-90	10	(Martínez <i>et al.</i> , 2003)
Agua estuarina y agua de río	<i>Opuntia ficus indica</i>	499 y 547	98.2 y 69.7	13	(Yang <i>et al.</i> , 2007)
Agua de río y agua artificial	<i>Cactus lefaria</i>	--	70-80	45	(Quirós <i>et al.</i> , 2010)
Agua de río con Pb	<i>Opuntia ficus indica</i>	--	--	8	(Nharingo, Zivurawa y Guyo, 2015)
Agua residual textil	<i>Opuntia ficus indica</i> + Sulfato de Aluminio	--	91.6	40	(Bouatay y Mhenni, 2014)
Agua residual municipal	<i>Opuntia ficus indica</i>	468	83.7	70	(Deshmukh y M. N. Hedao, 2018)
Agua cruda	<i>Opuntia ficus indica (tuna)</i>	174	82.95	40	(Olivero Verbe <i>et al.</i> , 2014)
Agua cruda	<i>Stenocereus griseus</i>	20 -100	70	300-600	(Fuentes S <i>et al.</i> , 2011)
Agua cruda	<i>Opuntia ficus indica (tuna)</i>	170	70	90	(Villabona, Paz y Martínez, 2013)
Agua municipal	<i>Opuntia ficus indica</i>	453	52	50	(Torres, Carpinteyro-urban y Vaca, 2012)
Agua de la industria textil	<i>Opuntia ficus indica</i>	--	91.66	40	(Bouatay y Mhenni, 2014)

Tabla 3. 2 Coagulantes utilizados en el tratamiento de agua

Referencia	Coagulante	Tipo de agua	Dosis óptima	pH	Turbidez (UTN)	% remoción
(Santiago <i>et al.</i> , 2012)	FeCl ₃ ·6H ₂ O y Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	Superficial y subterráneas	CF 40 mg/Ly SA= 16 mg/L	8-9 (SA)	20-37	--
(Cabrera <i>et al.</i> , 2009)	FeCl ₃ ·6H ₂ O y Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	Agua residual	40 mg/L (Al, Fe)	7 (SA), 4-5 (CF)	--	94.89 (SF) 80(CF)
(Dovletoglou, Philippopoulos y Grigoropoulou, 2002)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	Agua residual proveniente de pinturas	2,4 g / L	10 (SA)	304- 400	90%
(Jaouadi y Amdouni, 2013)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	Agua residual	30 mg/ L	6	4.8	--
(M. Campo y J. Tobar, 2011)	FeCl ₃ ·6H ₂ O	Agua residual PTAR	14 y 18 mg/L	6,2 - 6,8	122 NTU	--
(Llano <i>et al.</i> , 2014)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O + polímero aniónico A-100	Agua residual	20 mg/L	6	803	96%
(Gonzalez y Martín, 2003)	FeCl ₃ ·6H ₂ O y Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	Agua almacenada en el Bordo del ejido	30 - 60 mg/l	6.8	779	--
(Veliz y Guadalupe, 2016)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	Agua residual	100 mg/L	7	201	--
(Restrepo, 2009)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O Tipo B + Ultrión 8158	Agua cruda	48 mg/L	6.1	184	95%
(Solís, Laines y Hernández, 2012)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	Agua superficial	30 mg/ L	6.9	70	--
(Diaz <i>et al.</i> , 2017)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	Aguas residuales oleosas	100 mg/L	7	250	74%
(Zerbatto <i>et al.</i> , 2009)	FeCl ₃ ·6H ₂ O	Agua cruda	20-40 mg/L	5 a 8	--	--
(Suárez López, Jácome Burgos y Ures Rodriguez, 2014)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	Aguas residuales de la industria textil	35 -45 mg/ L	5.8 - 7.4	--	--
(Suárez López, Jácome Burgos y Ures Rodriguez, 2014)	FeCl ₃ ·6H ₂ O	Aguas residuales de la industria textil	25-35 mg/L	3.5 a 6.5 y > 8.5	--	--
(Trujillo <i>et al.</i> , 2014)	FeCl ₃ ·6H ₂ O	Agua proveniente de una fuente natural	75 mg/L	5	360	60%

3.2.2. Arreglo de datos

El arreglo de datos se hizo para cada una de las corridas, es decir, su aleatorización en cada uno de los tratamientos. Para el efluente de hemodiálisis se hizo una aleatorización de dosis con el coagulante: mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.*, sulfato de aluminio y cloruro de hierro. Así también, para el efluente de diálisis con los tres coagulantes mencionados anteriormente y con su aleatorización.

3.2.1.1. Arreglo de datos para dosis de 5 a 80 mg/L *Opuntia sp.*

Las dosis que fueron establecidas de acuerdo con la literatura reportada para el tratamiento de efluentes de diálisis y hemodiálisis fueron en la primera etapa de 5 a 80 mg/L.

Se realizó cada uno para los dos efluentes de agua por separado y en la tabla 3.3 - 3.4 se muestran los datos observados.

Tabla 3. 3 Aleatorización de dosis en la prueba de jarras para diálisis (5-80 mg/L).

Repetición	Número de jarra					
	1	2	3	4	5	6
1	65	80	20	50	35	5
2	80	20	50	65	5	35
3	65	20	50	35	80	5

Tabla 3. 4 Aleatorización de dosis en la prueba de jarras para hemodiálisis (5-80 mg/L).

Repetición	Número de jarra					
	1	2	3	4	5	6
1	65	80	20	5	35	50
2	80	5	65	50	20	35
3	65	20	80	50	35	5

3.2.1.2. Arreglo de datos para dosis de 5 a 35 mg/L *Opuntia sp.*

De acuerdo con los resultados generados en la primera etapa, se observó que las remociones se encuentran a dosis bajas por lo que se propuso el mismo diseño con un rango reducido de 5 a 35 mg/L, para así encontrar la dosis óptima de mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.* para los efluentes de diálisis y hemodiálisis, en la tabla 3.5 y 3. se pueden observar las aleatorizaciones para esta segunda etapa.

En esta segunda etapa se determinó la dosis óptima de mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.*

Tabla 3. 5 Aleatorización de dosis en la prueba de jarras para diálisis (5-35 mg/L).

Repetición	Número de jarra					
	1	2	3	4	5	6
1	30	5	15	20	35	25
2	15	20	35	30	5	25
3	30	25	15	5	20	35

Tabla 3. 6 Aleatorización de dosis en la prueba de jarras para hemodiálisis (5-35 mg/L).

Repetición	Número de jarra					
	1	2	3	4	5	6
1	35	25	30	5	15	20
2	15	20	5	25	35	30
3	35	15	20	5	30	25

3.3. Extracción del mucilago de nopal de nopal de poda *Opuntia sp.*

La extracción de mucilago de nopal de poda se realizó en el Instituto de Ciencias Biomédicas de la Universidad Nacional Autónoma de México y los cladodios fueron obtenidos de la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México.

El método de extracción que se empleó fue el reportado por Reyes-Ocampo *et al.*, 2019, llamado “*filtración simple*” que consta principalmente en vaciar el concentrado de nopal de poda con una serie de filtros de mayor a menor tamaño, hasta obtener un líquido clarificado para su posterior secado.



Figura 3. 3 Cladodios de nopal de poda. Lote 1 (Milpa Alta)

3.3.1. Metodología general para la extracción de mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.*

En la figura 3.3 se puede observar que la extracción inicia con un lavado y secado de los nopales de poda, esto para evitar que el mucilago que se va a extraer contenga tierra, en seguida se hace la molienda de los cladodios para iniciar su filtración y finalmente su secado para obtener el mucilago de nopal de poda en polvo.

Metodología general para la extracción de mucilago de nopal de poda

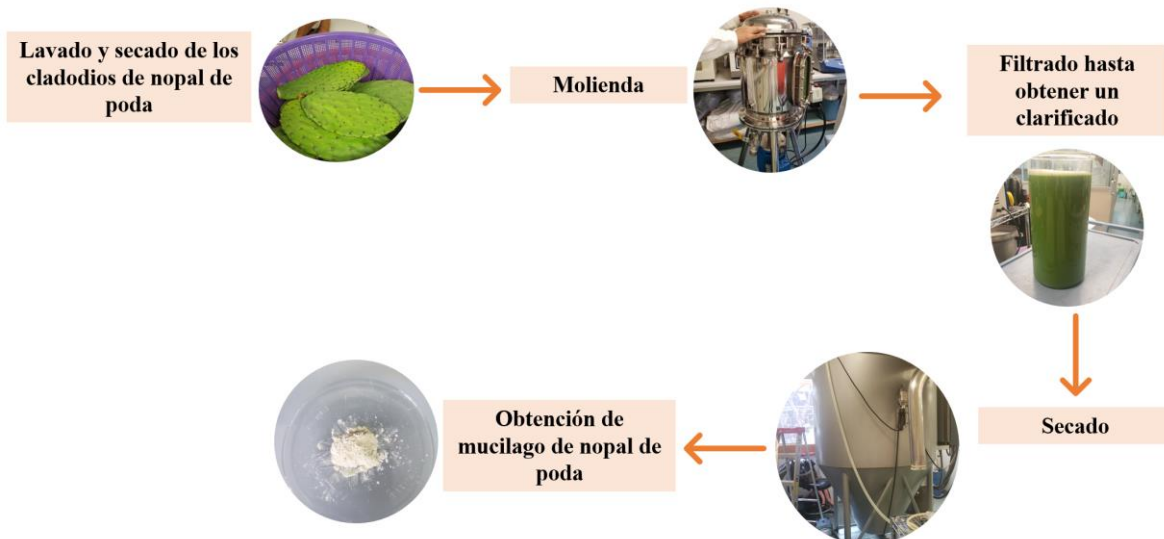


Figura 3. 4 Procedimiento de extracción de mucilago de nopal de poda

3.4. Muestreo de los efluentes de diálisis

El efluente proveniente de diálisis se muestreo de acuerdo con la normatividad NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, que se refiere a protección ambiental-salud, ambiental-residuos peligrosos biológico-infecciosos-clasificación y especificaciones de manejo, el cual se obtuvo en un hospital localizado en el sur de la Ciudad de México.

En las instalaciones del hospital para el efluente de diálisis se tienen indicaciones para el procedimiento de disposición final, que se mencionan en la figura 3.4:

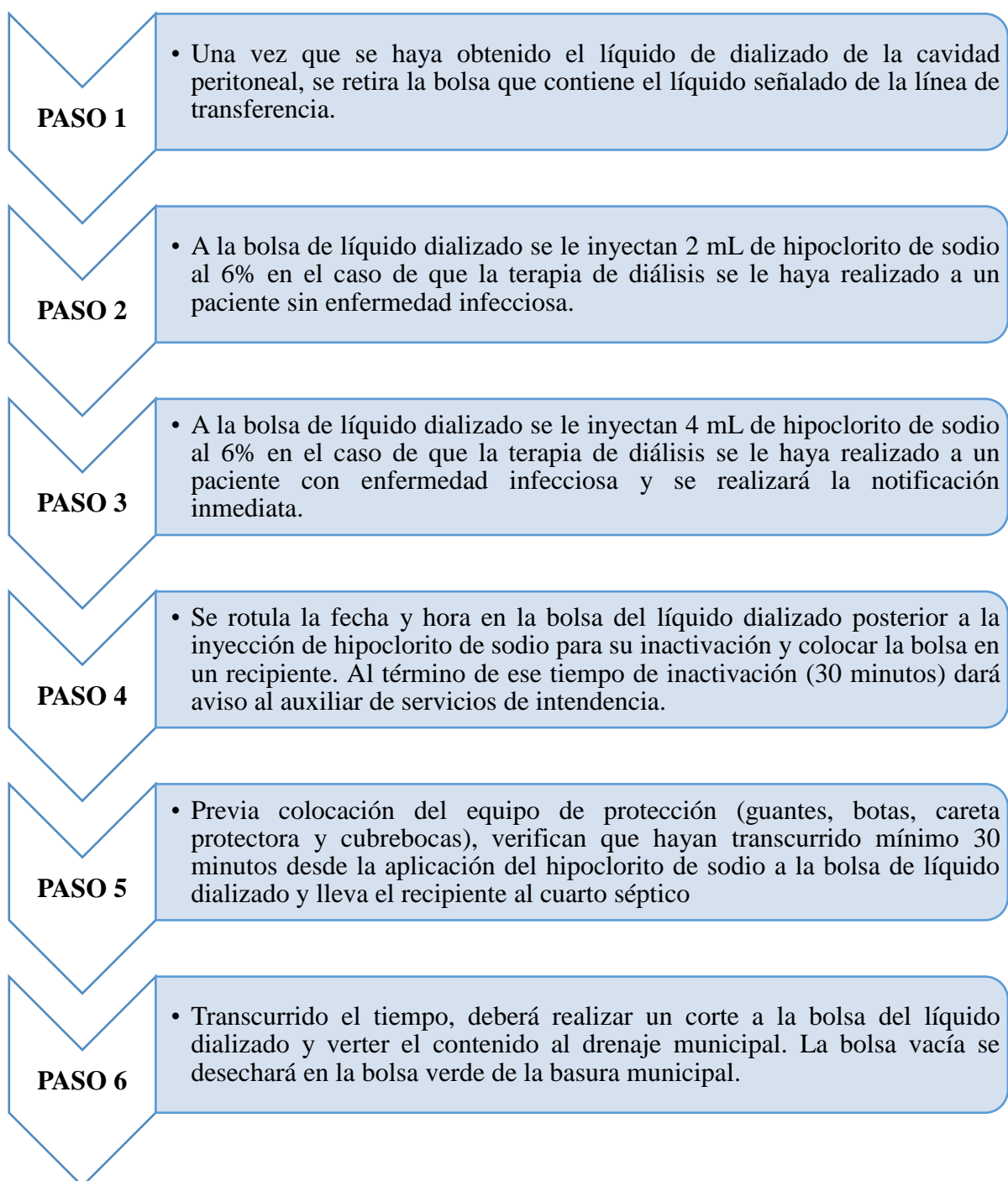


Figura 3. 5 Procedimiento de eliminación para el efluente de diálisis

Las bolsas de efluente de diálisis contienen: glucosa monohidratada, cloruro de magnesio hexahidratado, lactato de sodio y agua inyectable con un pH de 5.0 a 5.6.



Figura 3. 6 Muestreo de efluente de diálisis

El líquido de diálisis se tomó directamente de las bolsas que utilizan los pacientes sin la adición de hipoclorito de sodio, esto para poder realizar los estudios correspondientes y se vaciaron a un recipiente para su transporte. Por la localización del hospital no fue necesario usar hielo para su conservación, porque el trayecto del hospital donde se extrajo el efluente de diálisis al laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (LISA) es de 16 minutos.

3.5. Muestreo de los efluentes de hemodiálisis

Para el caso del muestreo del efluente de hemodiálisis se obtuvo en un hospital localizado en el sur de la Ciudad de México y tomando en cuenta las especificaciones para su manejo de acuerdo con la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002. La extracción del efluente se realizó por medio de la máquina de hemodiálisis a través de una manguera y se vació en los contenedores.

Por su localización cercana al laboratorio no se utilizó hielo para su conservación, el tiempo de trayecto del hospital al laboratorio (LISA) donde se extrajo el efluente de hemodialisis es de 18 minutos.



Figura 3. 7 Muestreo de efluente de hemodiálisis

Posteriormente se realizó la caracterización de las muestras en el laboratorio y fueron conservadas a 4°C en el cuarto frío.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del mucilago de nopal

Inicialmente, se extrajo el mucílago de las almohadillas de *Opuntia sp.* con el procedimiento de Reyes-Ocampo *et al.*, 2019, posteriormente se realizó la caracterización del mucilago por medio de espectroscopía de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), para esta técnica existen cuatro procedimientos principales de análisis, los cuáles son: transmisión, reflexión total atenuada (ATR), reflexión especular y reflectancia difusa.

Para la caracterización del mucilago de nopal de poda, se empleó un equipo de ATR-FTIR Shimadzu IRAffinity en el rango de longitud de onda entre 4000 a 650 cm^{-1} , los resultados se muestran en la figura 4.1.

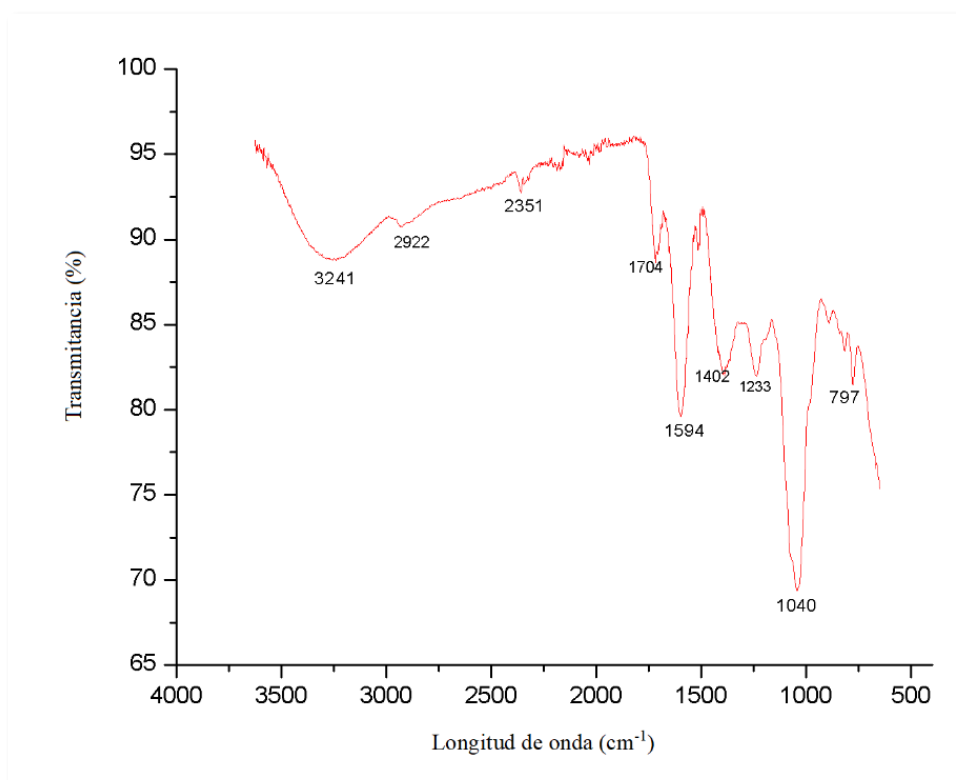


Figura 4. 1 IR Mucilago de nopal de poda

Sellami *et al.*, (2014) informaron que los análisis FTIR del mucilago de nopal, contiene los principales grupos funcionales presentes en el extracto de *Opuntia sp.*, los cuales son:

carboxilo (–COOH), hidroxilo (–OH) y grupos de amina (–NH₂), así como los enlaces de hidrógeno.

En la tabla 4.1 se observan algunos grupos funcionales que se pueden encontrar en el polvo de mucilago de nopal de *Opuntia spp.* que reporta Nharingo y Moyo (2016).

Tabla 4. 1 Números de onda de FTIR y compuestos en polvo de *Opuntia ficus* y mucilago

Longitud de onda cm ⁻¹	Grupo funcional	Componentes
>3100	-OH, -NH	Ácido carboxílico, aminoácidos, alcohol
3000	C=C-H	Anillos aromáticos
2915	estiramiento -CH ₃	Alcanos
2850	estiramiento CH ₂	Ácido carboxílico
1713	estiramiento -C=O	Grupos carbonilo
1658	-CONH ₂	Proteínas
1618	C=C	Alcanos
1574	NH	Aminas
1430	estiramiento -OH, estiramiento -C=O	Fenoles y Carboxilatos
1321	ArNH ₂ y CN	Aminas aromáticas primarias
1250	COO-	Sales de ácido carboxílico
1242	-COOH	Ácidos carboxílicos
1231	P=O	Fosfatos
1162 - 1229	-OH	1° y 2° alcoholes
1080	P-OH	Fosfatos
1072	-C-O- y -OH	polisacáridos
1041	HC-O-H	Alcoholes cíclicos
1027	R-CH ₂ OH	Unidades de glucosa en biopolímeros
<1000	aromáticos	Aminas aromáticas primarias

Adaptado de: (Nharingo y Moyo, 2016)

De acuerdo con Delgado *et al.*(2018); Fox (2011);Ibarra-Rodríguez *et al.*(2017);Nharingo, Zivurawa y Guyo(2015), los grupos funcionales que están presentes en este tipo de mucilago son: O-H, C-H y C=O principalmente. En la figura 4.1, la banda que se visualiza en 3241cm⁻¹ que corresponde al estiramiento O-H; la banda en 2922 cm⁻¹ se debe al enlace C-H de los grupos de alcanos; mientras que, la banda en 1704 cm⁻¹ es asignada a vibraciones de

estiramiento C=O asociada a ácido carboxílico y, en 1594 cm^{-1} , se asocia a grupos de COO y finalmente, en 1233 y 1040 cm^{-1} , corresponden a las vibraciones de tensión asimétrica C-O.

Entre los grupos más destacados que se observan son fosfatos, fenólicos, hidroxilo, carboxilatos, carbonilo, amidas y aminas entre otros, que dan lugar a la coagulación en los efluentes de diálisis y hemodiálisis.

4.2. Caracterización agua de hemodiálisis y diálisis

Para determinar los grupos funcionales del agua de hemodiálisis, también se empleó un equipo Shimadzu IRAffinity, con ATR, Reflexión Atenuada Total (por sus siglas en inglés), en el rango de longitud de onda entre 4000 a 650 cm^{-1} . En la figura 4.2 se muestra el equipo que se utilizó para la caracterización, este equipo tiene la ventaja que no requiere preparación de muestra.

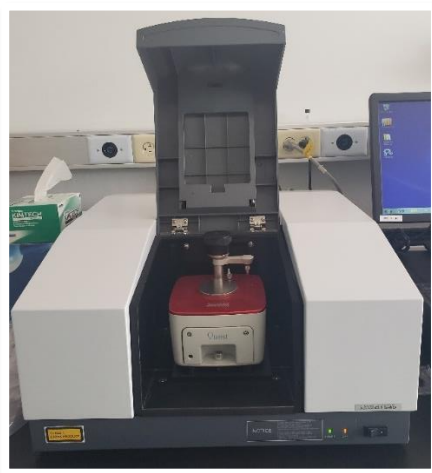


Figura 4. 2 FTIR Shimadzu con ATR

El espectrograma del agua de hemodiálisis se muestra en la figura 4.3, en donde se observa la banda de estiramiento de -OH en la longitud de onda 3294 cm^{-1} , así también en la región 2118 cm^{-1} y 1650 cm^{-1} , que están relacionadas con el grupo carboxilo COOH (Arroyo *et al*, 2018).

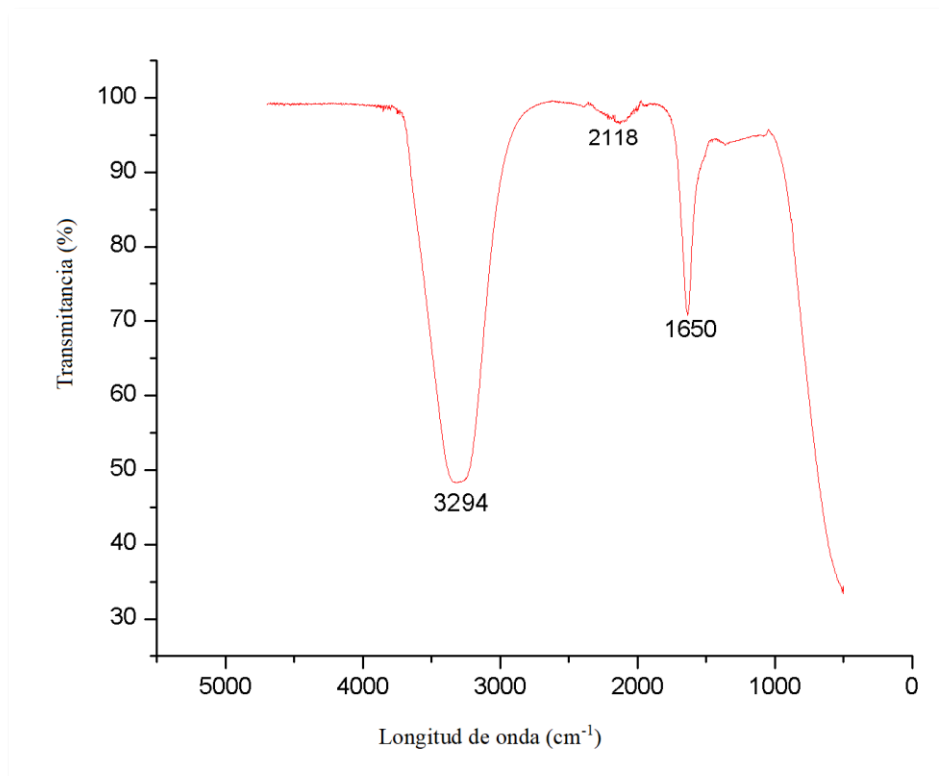


Figura 4. 3 IR de efluente hospitalario proveniente de hemodiálisis

En la figura 4.4 se puede visualizar el espectro IR del efluente de diálisis, donde se localiza la banda de estiramiento de -OH en la longitud de onda 3307 cm^{-1} , en la región 2986 cm^{-1} y 1631 cm^{-1} está relacionada con el grupo carboxilo COOH, además, se identifica una banda de estiramiento en 1059 cm^{-1} que está relacionada al grupo C-O (Arroyo *et al*, 2018).

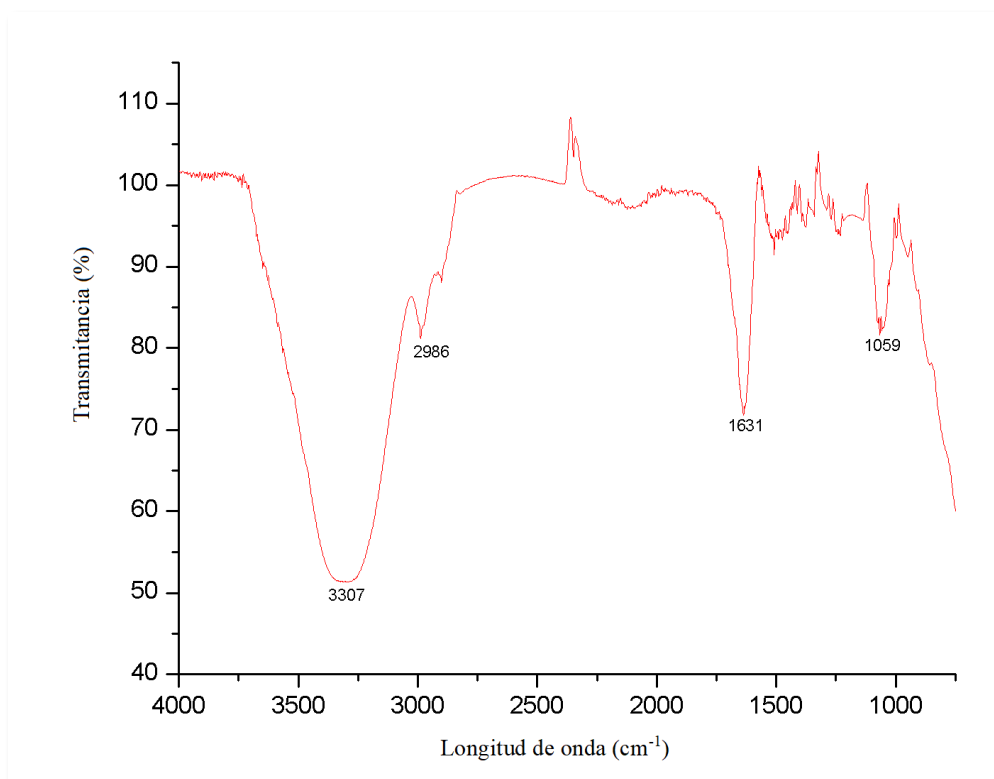


Figura 4. 4 IR de efluente hospitalario proveniente de diálisis

4.3. Análisis de los efluentes de hemodiálisis y diálisis

En la tabla 4.2 se muestran los resultados iniciales de la caracterización de los efluentes de diálisis y hemodiálisis, los datos muestran algunas variaciones de cada efluente, que a continuación se presentan:

Tabla 4. 2 Resultados de la caracterización del agua residual proveniente de hemodiálisis y diálisis

RESULTADO INICIAL				
Parámetro	Unidades	Hemodiálisis	Diálisis	Norma aplicada
Turbiedad	UTN	56.1	34.6	NMX-AA-038-SCFI-2001
DBO₅	mg/L	269	291.8	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO	mg/L	1824	6790	NMX-AA-012-SCFI-2001
pH	--	7.44	7.3	NOM-127- SSA1-1994
Temperatura	°C	26.5	26.4	AA-007-SCFI-2013
Sólidos disueltos	ppb	7.85	6.98	NMX-AA-034-SCFI-2015
Conductividad eléctrica	μS/cm	15.74	13.95	NMX-AA-093-SCFI-2000
Nitrógeno amoniacal	mg/L	113.98	541	MÉTODO HACH 8038, USEPA
Acidez total CaCO₃	mg /L	200	34	NMX-AA-036-SCFI-2001

En la tabla 2.5 correspondiente al capítulo del Marco Teórico, se observan algunas de las regulaciones de descarga para los efluentes hospitalarios, y es claro que no hay una estricta regulación, tal es el caso del pH que varía en el intervalo de 5.5 a 10 y la temperatura debe ser menor a 30 °C. Por otro lado, para la conductividad eléctrica establece que sea menor a 7500 (μS/cm), por lo cual, en este caso, ambos efluentes de diálisis y hemodiálisis logran estar dentro del rango para su descarga.

Para la DBO₅ establecen de 40 a 100 mg/L y ambos efluentes no logran pasar dichas regulaciones, así también para DQO se requiere de 0 a 1750, pero en este caso únicamente el efluente de hemodiálisis si está en dicho rango, de modo que el efluente de diálisis con 6790 mg/L rebasa dichas normas.

Para el nitrógeno amoniacal la regulación de la India (*The Bio Medical Waste Management and Handling Rules 1998 S.O.630(E), [20/ 7/1998]*) indica que no rebase los 50 mg/L por lo que el efluente de diálisis y el de hemodiálisis superan dicho rango.

4.4. Prueba de Jarras

Para remover la turbiedad se emplea el tratamiento de coagulación-floculación, el paso inicial es determinar la dosificación de coagulante, la cual fue evaluada con la literatura reportada y los parámetros establecidos de agitación de acuerdo con la ASTM D2035-08 que a continuación se presentan en la tabla 4.3:

Tabla 4. 3 Parámetros establecidos en la prueba de jarras de acuerdo con la ASTM D2035-08

Condiciones empleadas en pruebas de jarras			
	Mezcla rápida	Mezcla lenta	Sedimentación
Gradiente (rpm)	120	40	0
Tiempo (minutos)	1	20	15

Las fases de la coagulación se presentan de la siguiente forma: primero inicia con la hidrólisis del coagulante y la desestabilización de las partículas en suspensión, posteriormente da lugar a la formación de compuestos químicos poliméricos y la adsorción por puente de partícula para el caso de *Opuntia* sp. (Cárdenas *et al.*, 2000).

Después de la coagulación se forman microfloculos, esta reacción se favorece por la agitación lenta y estas son capaces de sedimentar; en el crecimiento del floculo intervienen tres mecanismos los cuáles son: pericinética que es una serie de colisiones y choques entre partículas debido a la energía térmica del fluido (movimiento Browniano), esto provoca un movimiento natural entre las moléculas del agua; la ortocinética que es provocada por el

movimiento inducido del agua, es decir, las paletas de agitación mecánica de la prueba de jarras, lo que ocasiona que las partículas colisionen y se unan, por último la agregación, que al unirse ganan peso y tamaño, logrando precipitar a mayor velocidad (Cárdenas *et al.*, 2000).



Figura 4. 5 Prueba de jarras en Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

4.4.1. Prueba de jarras para el efluente de diálisis con mucilago de nopal de *Opuntia sp.* del intervalo 5 a 80 mg/L

En la primera fase se evaluó la dosis de mucilago de nopal de 5 a 80 mg/L para los dos tipos de efluentes, posteriormente se pasó la muestra con kit Kitassato con un filtro # 40. La figura 4.6 presenta la media de los tratamientos, los cuales se repitieron 3 veces. Se observa que las mejores remociones son a dosis bajas de 5 a 35 mg/L.

Los resultados indican que no se puede distinguir cual es la dosis óptima para este tipo de efluente, ya que no existe una diferencia significativa en los tratamientos, por lo que se realizó una segunda etapa en el rango 5 a 35 mg/ L.

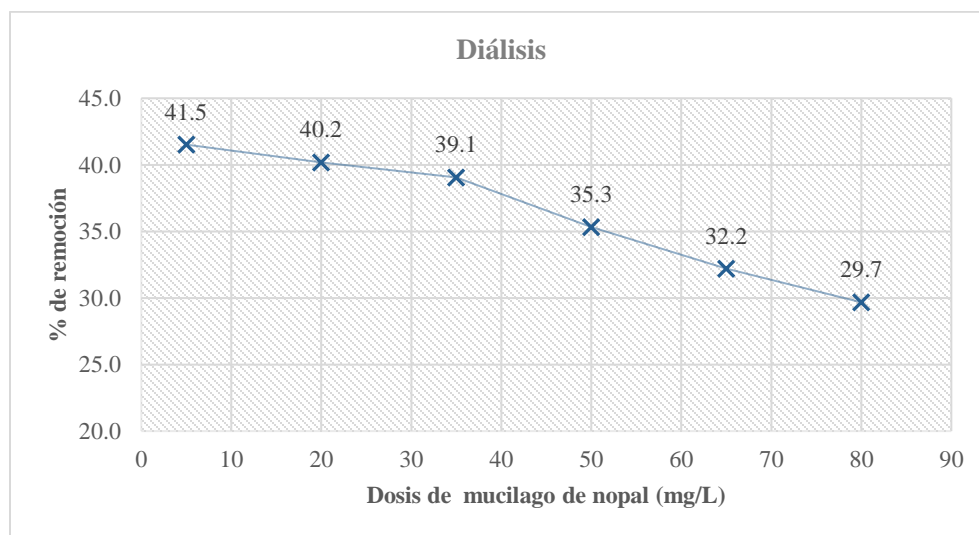


Figura 4. 6 Resultados de remoción de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5-80 mg/L)

De acuerdo con Miller (2008) y Cárdenas *et al.*(2000) la agregación de partículas se da a través de cuatro mecanismos que puede ser: compresión de doble capa, barrido, adsorción - neutralización de carga y adsorción - puente de partícula, esta última se asocia a la coagulación que presentan los coagulantes poliméricos, en especial *Opuntia sp.*, que opera en forma de puente, donde las partículas en solución no contactan directamente entre sí, sino que están unidas a un material similar al polímero.

4.4.2. Prueba de jarras para el efluente de diálisis con mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.* del intervalo 5 a 35 mg/L

Con el fin de constatar el dato de la dosis óptima, se realizó en una segunda etapa para el tratamiento del efluente de diálisis considerando un intervalo de 5 a 35 mg/L. En la figura 4.7 se observa el promedio de los tratamientos los cuales se repitieron 3 veces y se logra ver un cambio en la gráfica para la dosis de 25 mg/L.

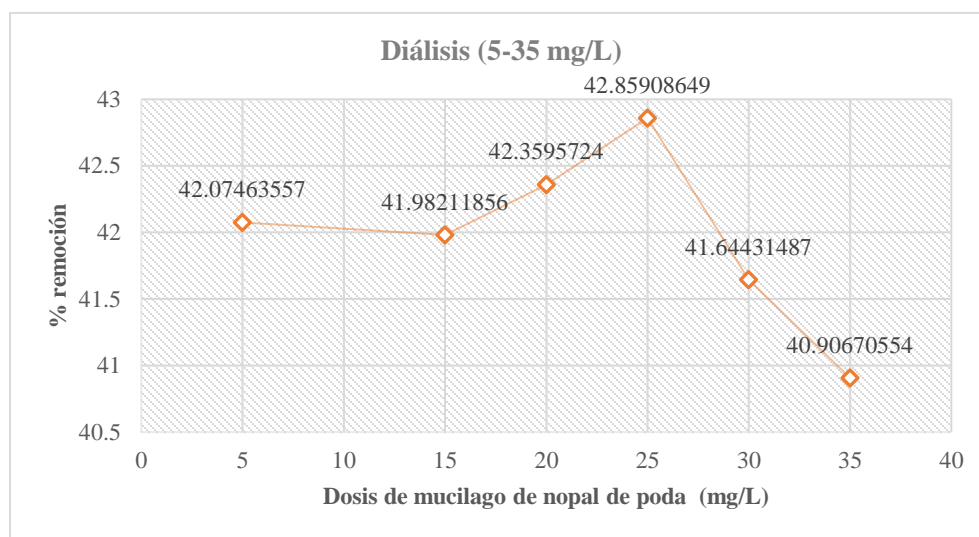


Figura 4. 7 Resultados de remoción de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)

De acuerdo con la investigación de Choque *et al.*, 2018 informa que las dosis óptimas de *Opuntia* se encuentran en el rango de 10 a 20 mg/L y remueven entre 80 a 90% de los sólidos; para el caso del efluente de diálisis se observa que la dosis óptima es de 25 mg/L y su porcentaje de remoción de turbiedad es de 42.85%, lo cual indica que existe remoción, pero las propiedades del efluente al contener partículas más pequeñas que las del agua residual doméstica hacen que el tratamiento no sea tan efectivo.

En la figura 4.8 se visualiza los pequeños flóculos que se obtuvieron del tratamiento del efluente de diálisis y de acuerdo con el índice de Willcomb es de 4, es decir, son flóculos bien formados que sedimentan muy lentamente (Giordani, Gonzáles y Morales, 2008; Lorenzo, 2006).

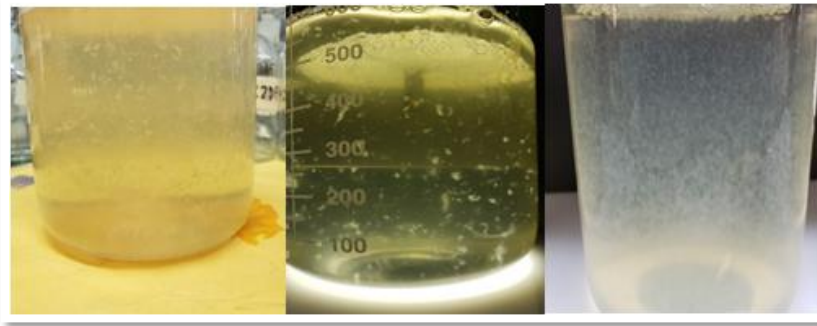


Figura 4. 8 Vista frontal de los flóculos con el efluente de diálisis

En la prueba de jarras se observó que la sedimentación fue lenta debido a que los flóculos son pequeños, esto se debió al tipo de agua residual que proviene del cuerpo humano y el tamaño de las partículas es pequeña. La cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación del flóculo, y se examina que las mejores remociones son a dosis bajas, por lo tanto, la formación de flóculos fue prolongada.

Para constatar dichos resultados es necesario realizar el análisis de varianza y verificar que existe una diferencia significativa. En la tabla 4.4 se observa el ANOVA para el efluente de diálisis del rango 5 a 35 mg/L.

Tabla 4. 4 Resultados de ANOVA para diálisis de 5 a 35 (mg/L)

Análisis de varianza					
Respuesta: (%) Remoción de turbidez					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosis	5	5.936	1.1872	2.3553	0.104
Residual	12	6.0487	0.50406		

Para rechazar la hipótesis nula el nivel de significancia deberá ser menor a 0.05, con el valor obtenido de 0.1, entonces se acepta la hipótesis nula y no hay efectos en los tratamientos.

Se puede observar un rango de remoción entre 40.90% a 42.85 %, lo cual significa que no hay demasiada variación entre una y otra, entre las que se identifican como las mejores remociones son: 20 y 25 mg/L y entre esas dos dosis, podemos verificar que hay una diferencia de remoción de aproximadamente 0.5 %, la mejor remoción que se observa en dicho intervalo es de 25 mg/L.

Así mismo, se efectuó la medición del pH después de la prueba de jarras y se observó que incrementó su valor con la adición de mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.* Por otro lado, se ha mencionado por Yin (2010) que a un pH superior a 7, la concentración de OH^- aumenta e interrumpe el equilibrio de iones en la solución y permite que más protones del grupo carboxilo formen moléculas de agua y exponga más sitios de adsorción de COO^- . El mucilago de nopal de poda obtiene mejores resultados de coagulación cuando se trabaja a valores alcalinos de pH. En la figura 4.9 el pH inicial de la muestra fue 7.3 y el valor de pH para la dosis óptima fue de 8.28.

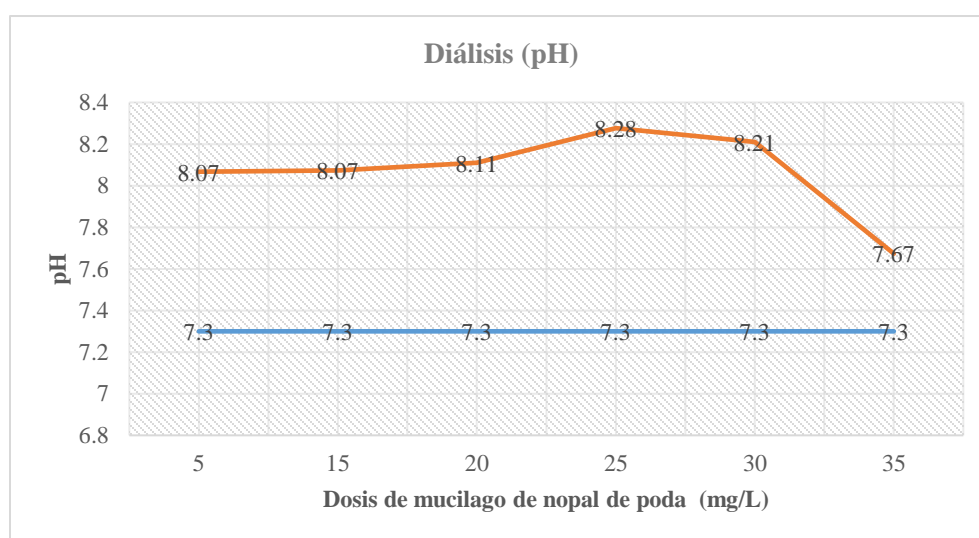


Figura 4. 9 Resultados de pH de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)

La conductividad eléctrica inicial de la muestra de diálisis fue de 13.95 μS como se muestra en la figura 4.10 y se logra ver una reducción para 25 mg/L a 12.27 μS , aunque el cambio no fue prominente, pero se logró un cambio con relación a la medición inicial.

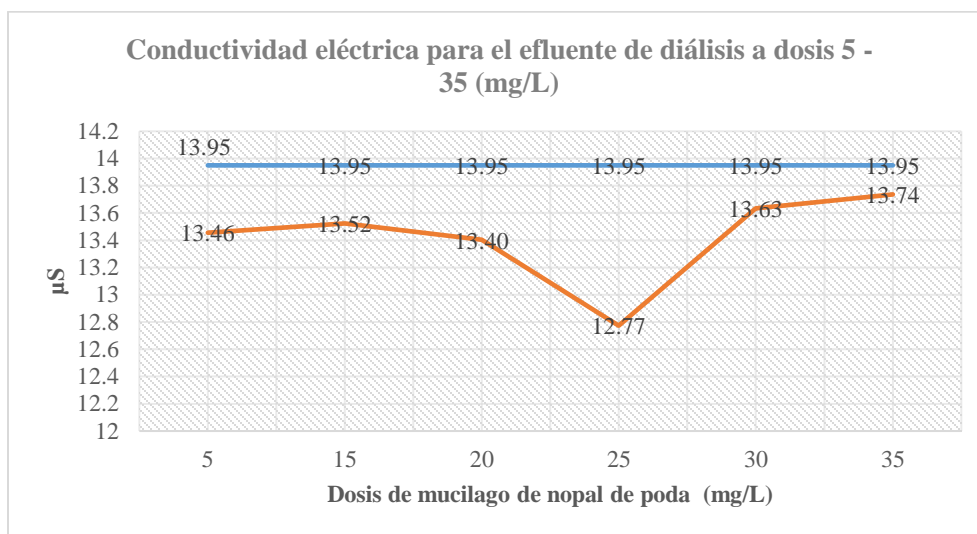


Figura 4. 10 Resultados de conductividad eléctrica de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)

Los sólidos disueltos, es el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica el valor inicial de la muestra de diálisis fue de 6.98 ppm como se visualiza en la figura 4.11, en donde las mejores reducciones de sólidos disueltos se encuentran para la dosis de 15 mg/L y 25 mg/L, en esta última se logró ver que existe mayor diferencia entre los resultados.

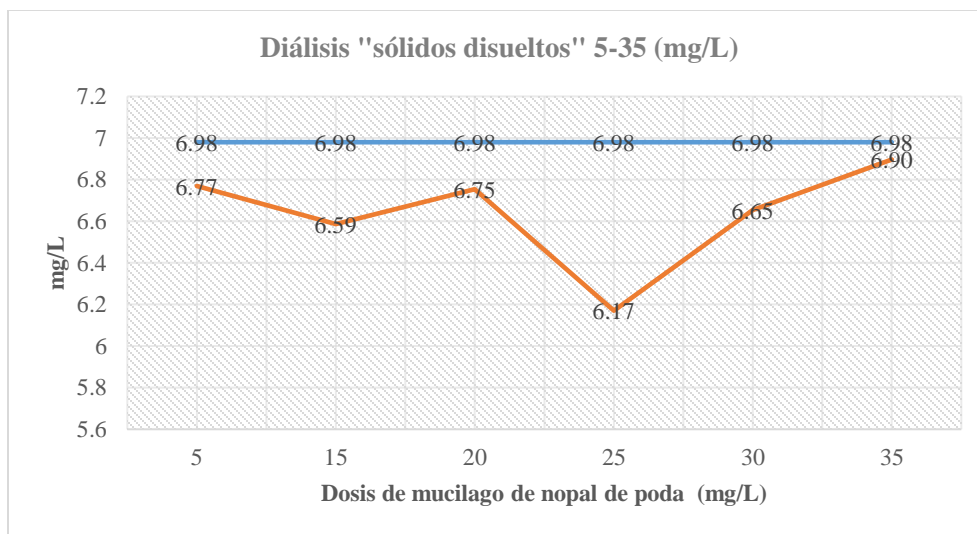


Figura 4. 11 Resultados de sólidos disueltos de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas químicamente, en las que engloba la oxidación completa de la muestra, es decir, materia orgánica, biodegradable y no biodegradable que es químicamente oxidada. Los resultados de la figura 4.12 de la prueba de jarras para el efluente de diálisis observan una reducción en el intervalo de 25 a 30 mg/ L y para las dosis de 15 a 20 mg/L se visualiza que no se adquiere ninguna reducción de dicho parámetro.

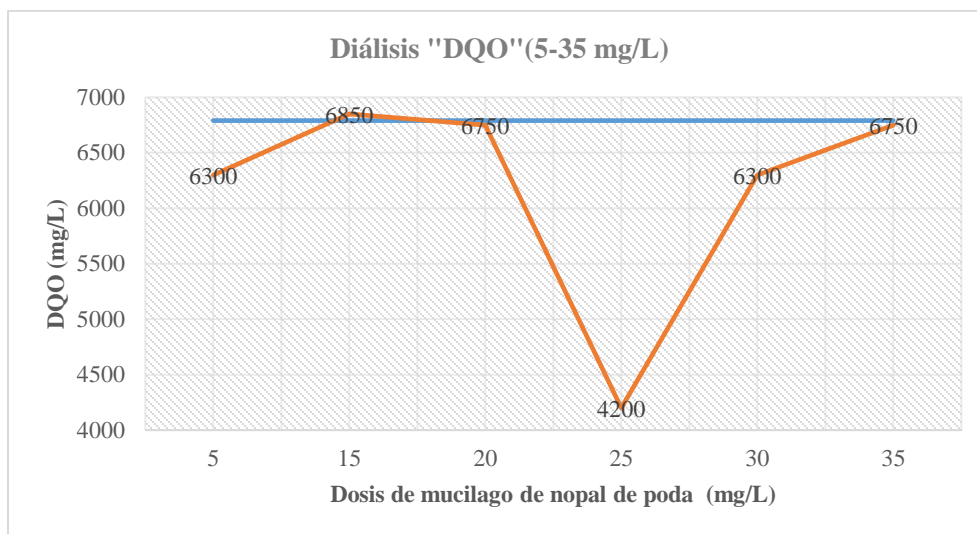


Figura 4. 12 Resultados de demanda química de oxígeno de la prueba de jarras para efluente de diálisis (5- 35 mg/L)

4.4.3. Lodos generados en el tratamiento de diálisis con mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.*

En la figura 4.13 se observa el clarificado del efluente de diálisis y al fondo los lodos generados de dicho tratamiento, se identifican los flóculos de tamaño pequeño como se menciona anteriormente. Es importante mencionar que la cantidad de lodos es pequeña en comparación con otros tratamientos, es decir, el mucilago de nopal de poda genera en menor cantidad lodos.

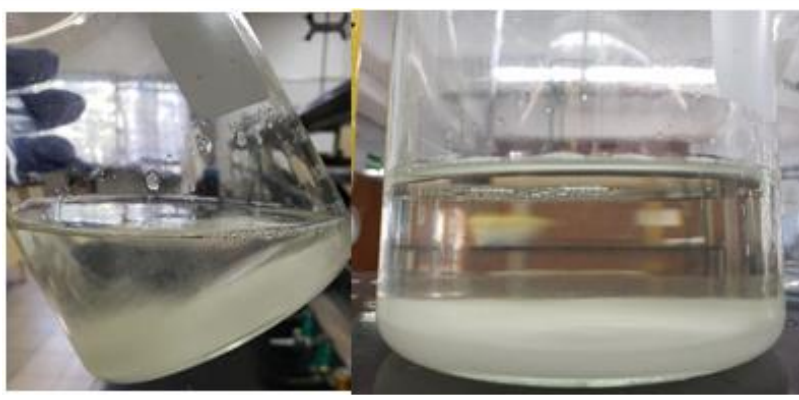


Figura 4. 13 Vista frontal del clarificado del efluente de diálisis

Los lodos generados en el proceso de coagulación – floculación del efluente de diálisis se filtraron al vacío con un filtro # 40 y se caracterizaron en el espectrómetro Shimadzu IRAffinity, con ATR (Reflexión atenuada total), en el rango de longitud de onda entre 4000 a 650 cm^{-1} .



Figura 4. 14 Lodos generados de la prueba de jarras "diálisis"

En la figura 4.15 se muestra la gráfica del análisis por FT-IR donde se presenta la longitud de onda en 3281cm^{-1} que indica el grupo O-H, después en la banda 1631 cm^{-1} se observa el grupo C=O, también la banda 1539 cm^{-1} que se atribuye al grupo COOH. Por último las bandas en 1395 y 1079 cm^{-1} que corresponden a las vibraciones de tensión asimétrica del enlace C-O (Delgado *et al.*, 2018).

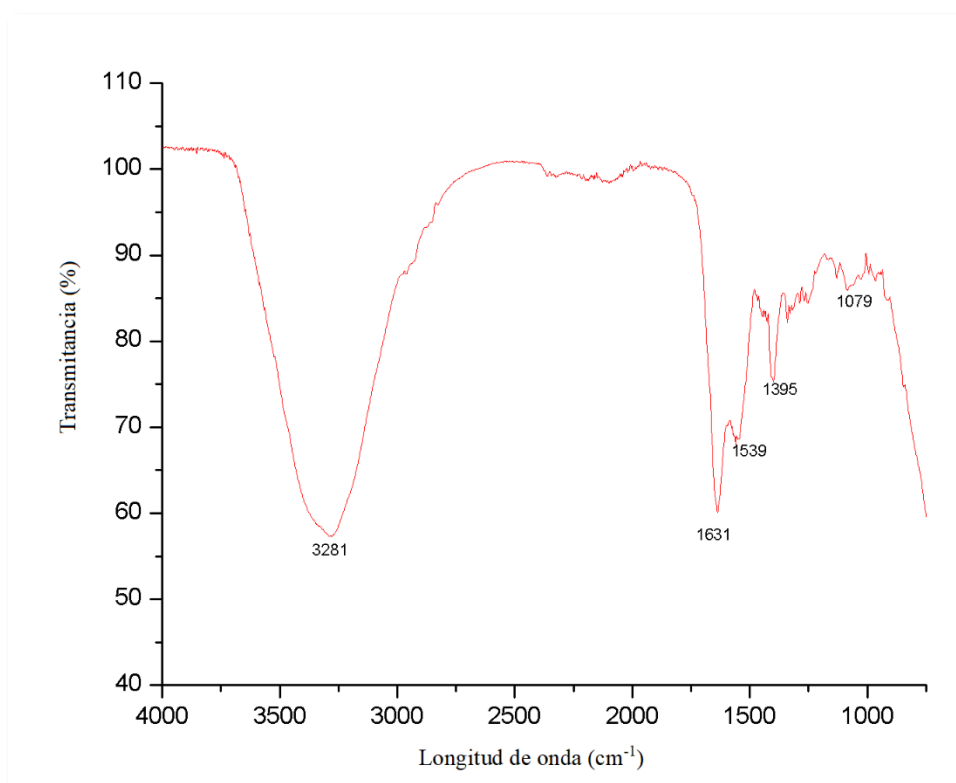


Figura 4. 15 IR de los lodos provenientes del tratamiento de diálisis

Cabe destacar que el espectro IR del mucilago de nopal de poda y los lodos generados en dicho proceso se ven con mayor estiramiento principalmente para los grupos O-H y C=O, pero para el grupo C-O disminuye su estiramiento.

4.4.4. Prueba de jarras para el efluente de hemodiálisis con mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.* de 5 a 80 mg/L

En la figura 4.16 están los resultados de la primera etapa que son los promedios de las 3 repeticiones de los tratamientos para el efluente de hemodiálisis. Se observa, que las mejores remociones también se logran a dosis bajas, pero no se aprecia una diferencia en los tratamientos por lo que se realizó una segunda etapa para determinar la dosis óptima para el tratamiento.

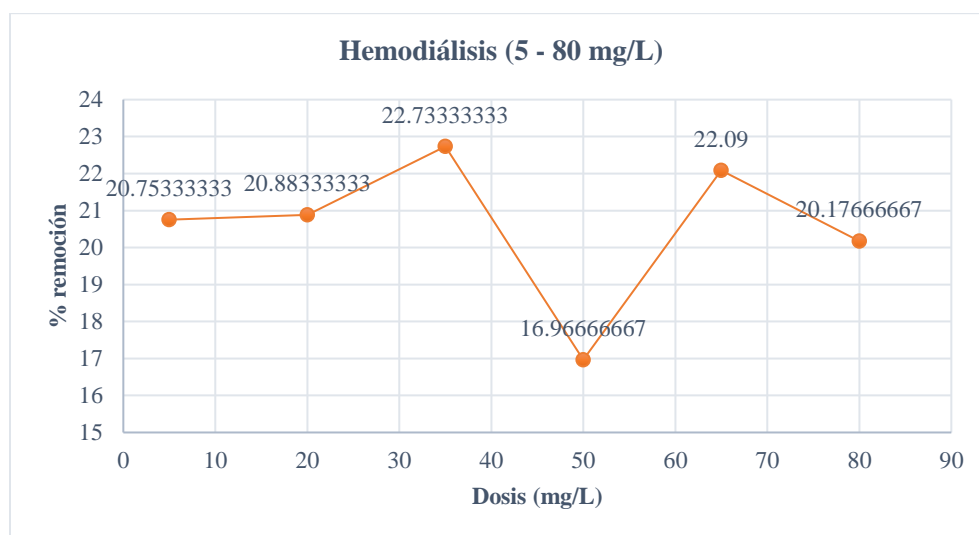


Figura 4. 16 Resultados de remoción de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5-80 mg/L)

Algunos de los flóculos en la prueba de jarras se observan en la figura 4.17 y de acuerdo con el índice de Willcomb se puede establecer que el índice es de 2, lo cual indica que los flóculos son muy pequeños, esto se debe a que las partículas que están presentes en el agua residual de hemodiálisis son aún más pequeñas en comparación con el efluente de diálisis, los flóculos son todavía más diminutos.



Figura 4. 17 Vista en planta de flóculos en prueba de jarras

4.4.5. Prueba de jarras para el efluente de hemodiálisis con mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.* de 5 a 35 mg/L

Con el fin de verificar la dosis óptima de mucilago de nopal para el efluente de hemodiálisis, se consideró una segunda etapa en el intervalo de 5 a 35 mg/L. Los resultados están en la figura 4.18 y para este tratamiento la mejor dosis fue de 15 mg/ L con 21.9% de remoción de turbiedad.

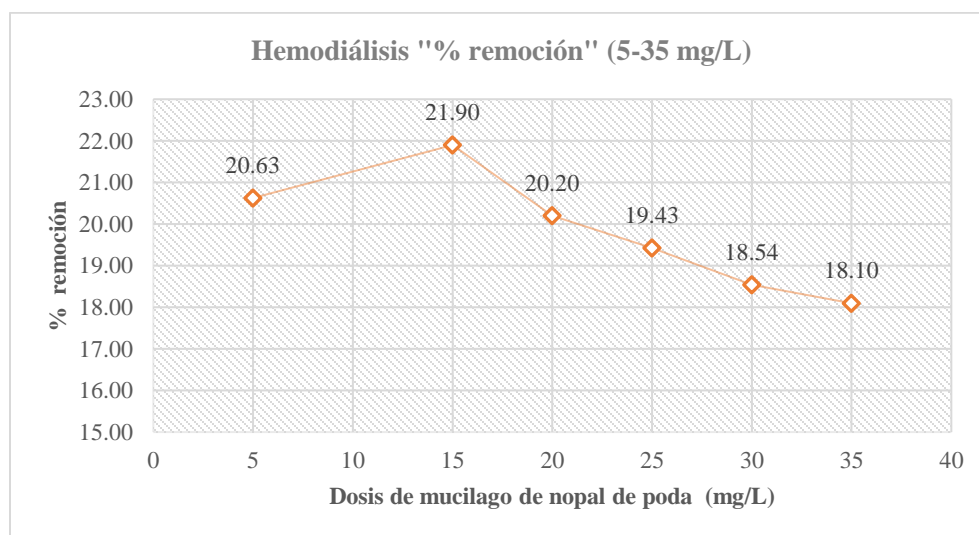


Figura 4. 18 Resultados de remoción de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)

Miller (2008) y Manunza (1997) informan que el mucilago de nopal de *Opuntia sp.* ofrece la capacidad de coagulación, es decir, su ingrediente activo “ácido galacturónico” que es un componente principal de la pectina en plantas, el cual se presenta en forma polimérica. El mecanismo por el cual trabaja es a través de la coagulación por “puente” donde las partículas en solución no contactan directamente uno con otro, pero están unidos a un material similar al polímero que ocasiona que estas se adsorban. El ácido galacturónico indica evidentemente que es aniónico debido a la desprotonación parcial del grupo funcional y la existencia de grupos funcionales a lo largo de la cadena, implica la quimisorción que pueden producirse en partículas cargadas y -COO-.

La adsorción por puente ocurre cuando pequeños macropolímeros se agregan a los coloides, se adsorbe en las partículas en una cadena individual que pueden ser en negativo o neutral (Nharingo and Moyo, 2016).

En la tabla 4.5 se pueden ver los resultados del análisis de varianza (ANOVA) en hemodiálisis de 5 a 35 mg/ L, de acuerdo a estos resultados se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que hay diferencias en los tratamientos.

Tabla 4. 5 Resultados de ANOVA para hemodiálisis de 5 a 35 (mg/L)

Análisis de varianza					
Respuesta: (%) Remoción de turbidez					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosis	5	29.6702	5.934	26.623	4.20x10⁻⁶
Residual	12	2.6747	0.2229		

De acuerdo con el resultado de *p value* se rechazó la hipótesis nula, es menor que el nivel de significancia de 0.05, entonces para este caso se puede decir que hay diferencias significativas en los tratamientos, por lo tanto, la dosis que se aproxima a ser óptima se encuentra a 15 mg/L.

Tabla 4. 6 Comparaciones de tratamiento por pares Tukey

Dosis	Media	Comparación entre tratamiento		
35	18.1	a		
30	18.54	a	b	
25	19.43		b	c
20	20.2			
15	21.9			c
5	20.63			

En la tabla 4.6 al realizar el cruce entre dosis de cada tratamiento para realizar la comparación en pares, se observa en la mayoría de los casos son iguales entre pares, a excepción de la dosis de 15 mg/L, no es igual a otra y tiene mayor media, por lo tanto, es la mejor dosis de todas las reportadas en ese intervalo.

En la figura 4.19 se detalla el cambio de pH de la muestra a diferentes dosis de mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.* y se observa que el pH inicial es de 7.44 y aumenta hasta 8 provocando un efecto sobre la coagulación del efluente de hemodiálisis. Como ya se ha mencionado por Yin (2010) los coagulantes naturales son más efectivos en aguas alcalinas, esto permite la adsorción ocurra entre las partículas. En el caso del efluente de hemodiálisis se tiene un pH superior a 7, por lo tanto, la concentración de OH^- aumenta e interrumpe la concentración de equilibrio de iones en la solución y expone más sitios de adsorción de COO^- .

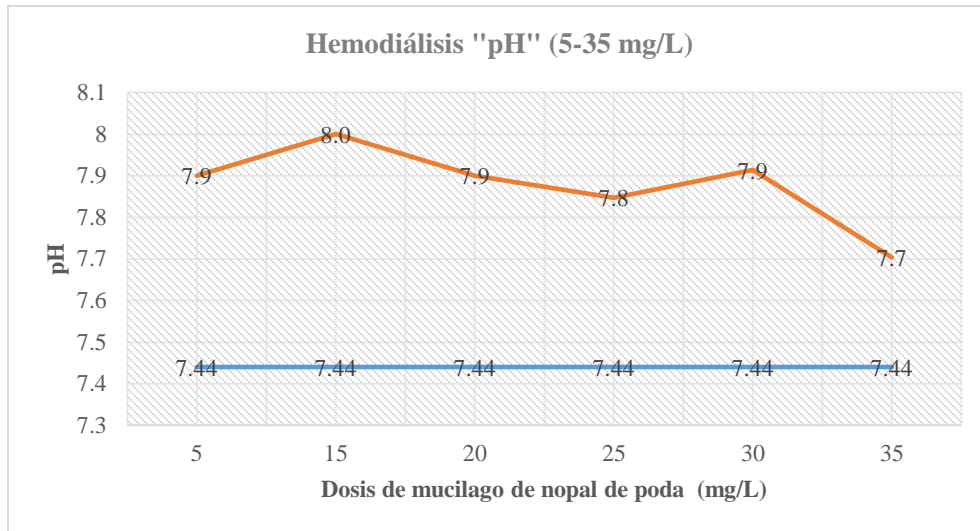


Figura 4. 19 Resultados de pH de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)

El principal comportamiento con el mucilago de nopal de poda se debe a el ácido galacturónico es un polisacárido también es denominado ácido péctico. La reactividad del ácido galacturónico contiene OH^- eso representan sitios ácidos disponibles para la desprotonación, ya que las moléculas de mucílago tienden a tener carga negativa, porque los iones de hidrógeno pueden disociarse como parte carboxílica de los ácidos galacturónicos, es importante, porque algunas de las propiedades fisicoquímicas del mucílago son dependientes de la forma ionizada del grupo carboxílico (Yin, 2010; Rodríguez *et al.*, 2014).

En la figura 4.20 indica la conductividad eléctrica que es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. En este tratamiento se observa que en la dosis de 15 mg/ L disminuye la conductividad eléctrica de 15.74 a 14.55, lo cual revela un cambio en el estado inicial.

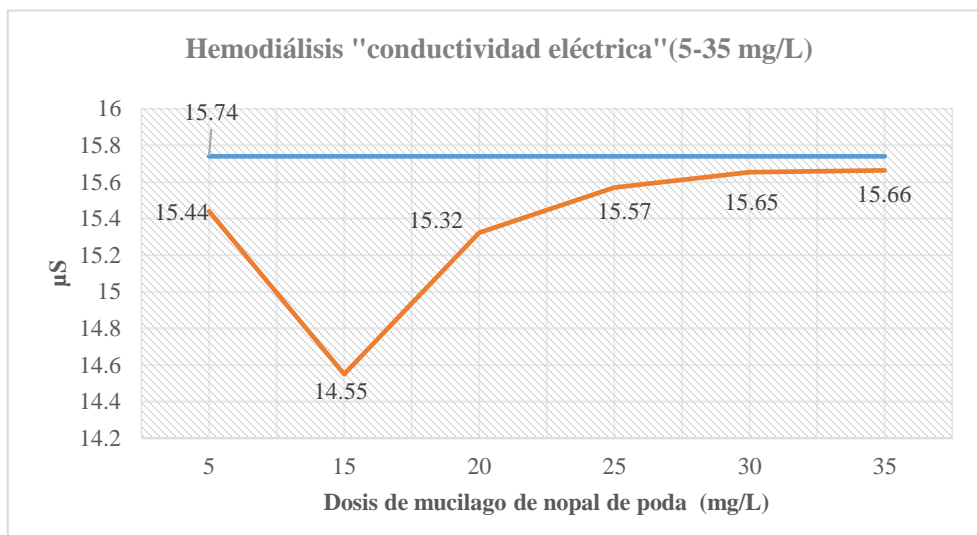


Figura 4. 20 Resultados de conductividad eléctrica de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)

Para el caso de los sólidos disueltos, en el rango en donde se encuentra mayor remoción es en la dosis de 5 a 15 mg/ L, como se aprecia en la figura 4.21, también se puede ver que a mayores concentraciones de mucílago se incrementan la cantidad de los sólidos en la disolución. El tratamiento tuvo efecto al aplicar el mucilago de nopal de poda en las diferentes dosis, donde se logra visualizar como hay una reducción de los sólidos disueltos, pero en la dosis de 15 mg/ L se identifica la mayor reducción de estos.

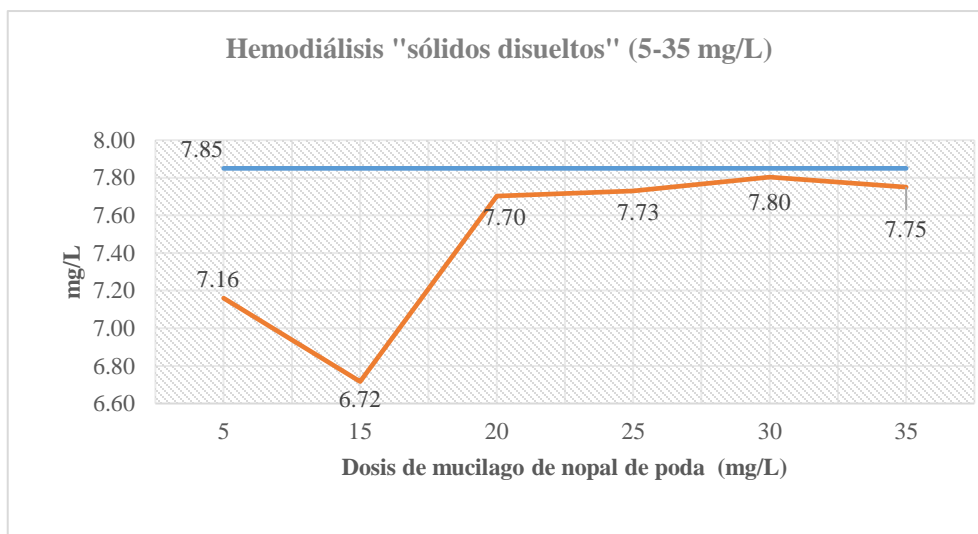


Figura 4. 21 Resultados de sólidos disueltos de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)

La demanda química de oxígeno (DQO) mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas, los resultados para el efluente de hemodiálisis se muestran en la figura 4.22 ahí se observan los promedios de las tres repeticiones en el intervalo de 5-35 mg/L, en donde se visualiza una disminución en dicho parámetro.

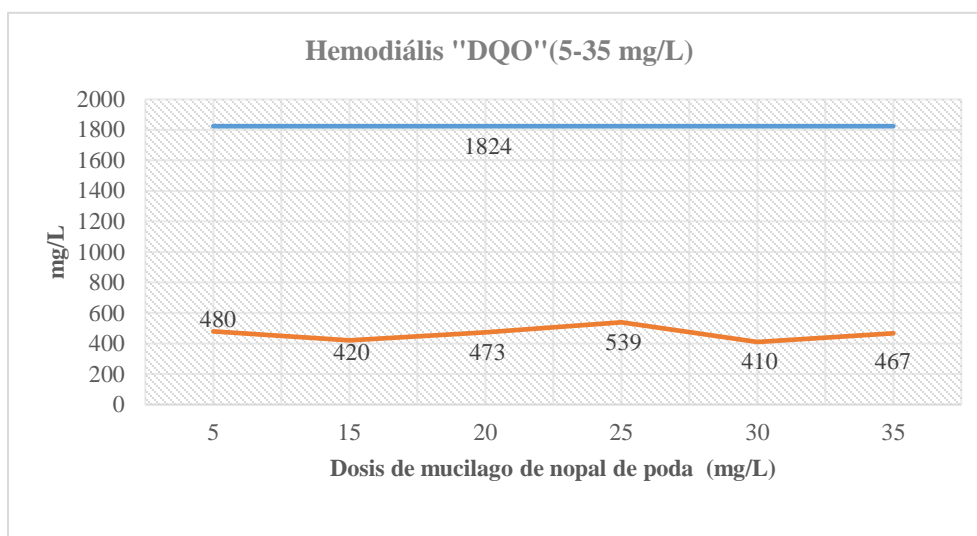


Figura 4. 22 Resultados de demanda química de oxígeno de la prueba de jarras para efluente de hemodiálisis (5- 35 mg/L)

La dosis de coagulante, de acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de jarras de acuerdo con la ASTM D2035-08, es de 15 mg/L para efluente de hemodiálisis y 25 mg/L para efluente de diálisis.

4.4.6. Lodos generados para el tratamiento de hemodiálisis con mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.*

Los lodos generados en dicho tratamiento son insignificantes a comparación del tratamiento de diálisis, por lo que eran mínimos debido al tamaño de partícula, como se sabe el proceso de hemodiálisis se lleva a cabo vía intravenosa, a lo que se debe que los microflóculos sean menores que los obtenidos al tratamiento de diálisis.

4.4.7. Dosis óptima de mucilago de *Opuntia sp.* vs ajuste de pH para los efluentes de diálisis y hemodiálisis

En la figura 4.23 se observan los porcentajes de remoción de turbiedad a diferente pH para el efluente de diálisis.

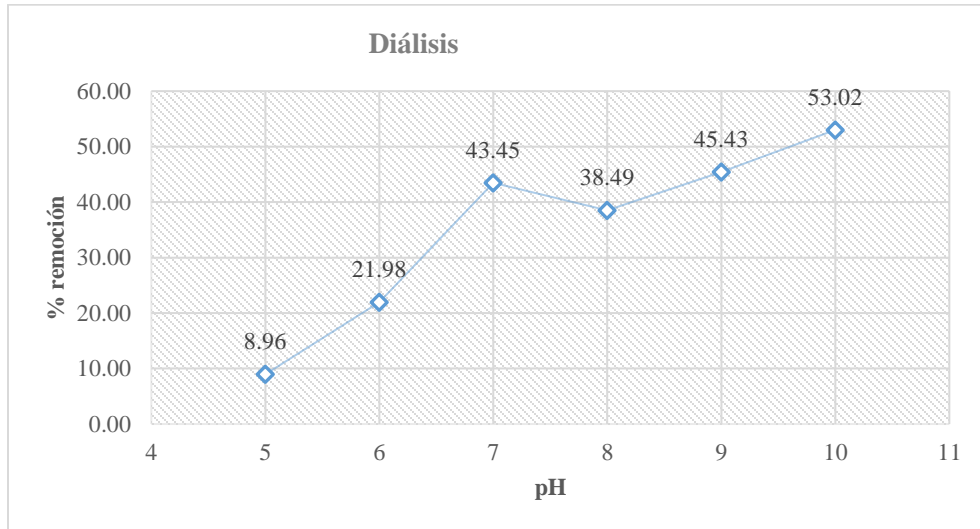


Figura 4. 23 Efluente de diálisis "pH vs % de remoción de turbiedad"

Para el efluente de diálisis, la dosis óptima de mucilago de *Opuntia sp.*, es de 25 mg/ L, se realizó un ajuste de pH, dando como resultado una remoción de turbiedad del 53.02 % con pH óptimo de 10.

En la figura 4.24 se muestra la gráfica de porcentaje de remoción de turbiedad y dosis óptima para el efluente de hemodiálisis.

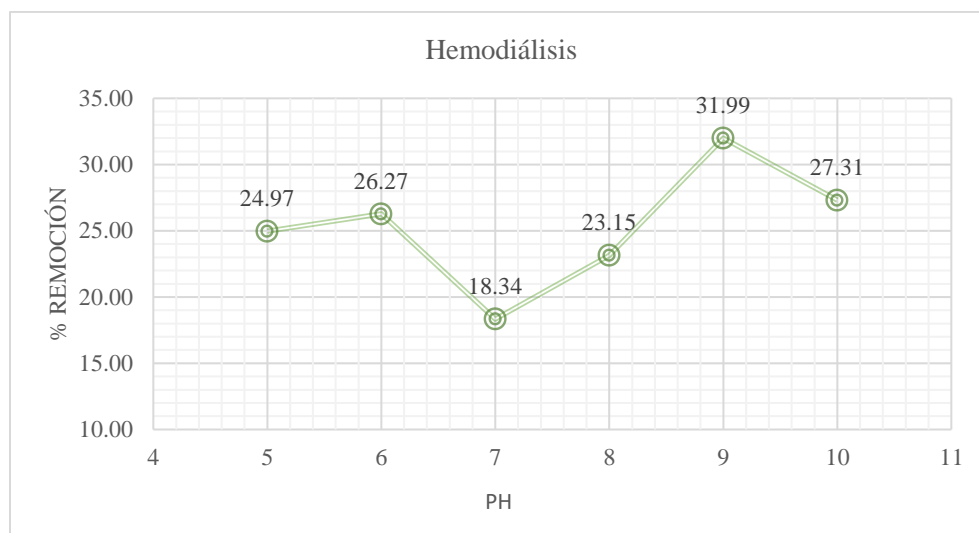


Figura 4. 24 Efluente de hemodiálisis "pH vs % de remoción de turbiedad"

En el caso del efluente de hemodiálisis, la dosis óptima de *Opuntia* sp. es de 15 mg/L, el mejor valor de pH es de 9, consiguiendo una remoción de 31.99%.

4.4.8. Prueba de jarras con coagulantes comerciales

La prueba de jarras se aplicó con otra muestra totalmente diferente, con los siguientes coagulantes comerciales: sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) y cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$); las dosis que se establecieron para dicho tratamiento fueron basadas en la literatura reportada en los capítulos anteriores y acotando el intervalo para poder hacer las comparaciones de mucilago de nopal vs coagulantes químicos.

El intervalo en el que se realizó la prueba de jarras fue de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 mg/L respectivamente, se utilizó el diseño de experimentos de bloques completamente al azar, de igual forma en la que se realizó para el mucilago de nopal *Opuntia* sp. La determinación de hacer dos repeticiones fue debido a que ya no había suficiente muestra para elaborar un número mayor. Es importante mencionar que para este tratamiento con coagulantes químicos se utilizó una muestra totalmente diferente a la realizada por *Opuntia ficus* sp.

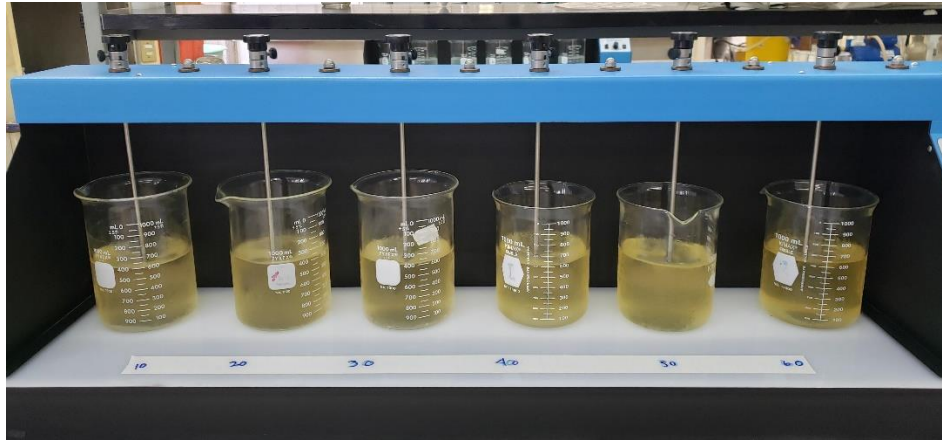


Figura 4. 25 Prueba de Jarras con coagulante químico. Elaboración propia.

4.4.9. Prueba de jarras para el efluente de diálisis con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$

En la figura 4.26 se muestra el promedio de pH inicial y final de la prueba de jarras para el efluente de diálisis con sulfato de aluminio, es también conocido como alumbre. Su rango óptimo de pH varía entre 5.5 y 8 (Lorena and Garzón, 2015), en otro trabajo por Vargas Camareno y Romero Esquivel (2006) estos autores explican que el rango de trabajo para este efluentes es de 5.5 a 7.5. Haciendo énfasis en estos autores se puede generar el intervalo de trabajo para el sulfato de aluminio es de 5.5 a 8.0.

La muestra de diálisis contiene un pH 8.25 lo que implica que esta fuera de dicho rango, aunque al agregar sulfato de aluminio este disminuye su pH. Se observa en la gráfica 4.25 el descenso de pH de la muestra hasta 8.02 unidades; en el rango de 30 a 60 mg/L es posible identificar una disminución de dicho parámetro.

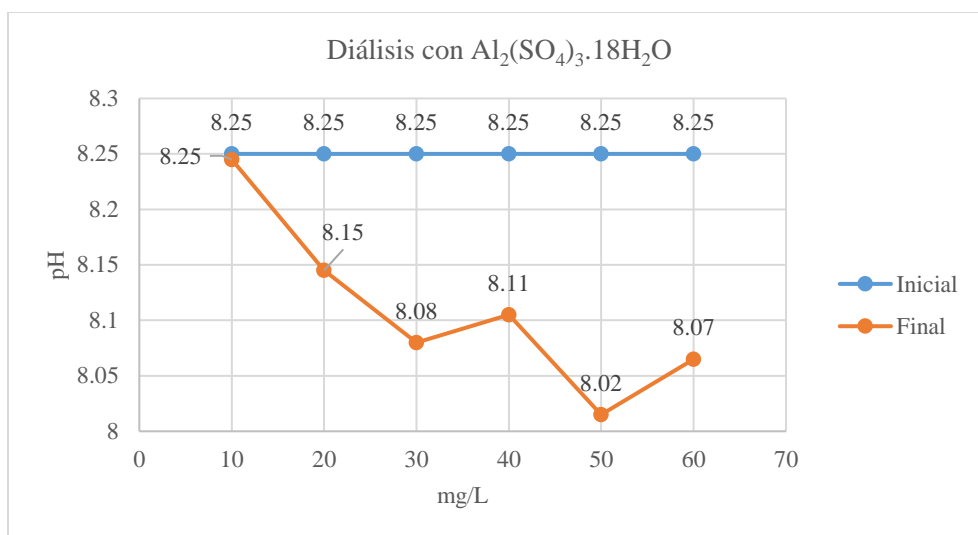


Figura 4. 26 Resultados de pH para efluente de hemodiálisis con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$

El promedio de la demanda química de oxígeno que se visualiza en la figura 4.27 que da como resultado en el proceso de coagulación- floculación una disminución de DQO en 10, 20, 30 y 60 mg/L, corroborando esa información con la figura 4.27 que muestra la remoción de turbiedad a diferentes dosis y se verifica que para las dosis de 10 a 20 mg/L, se encuentran las mejores remociones.

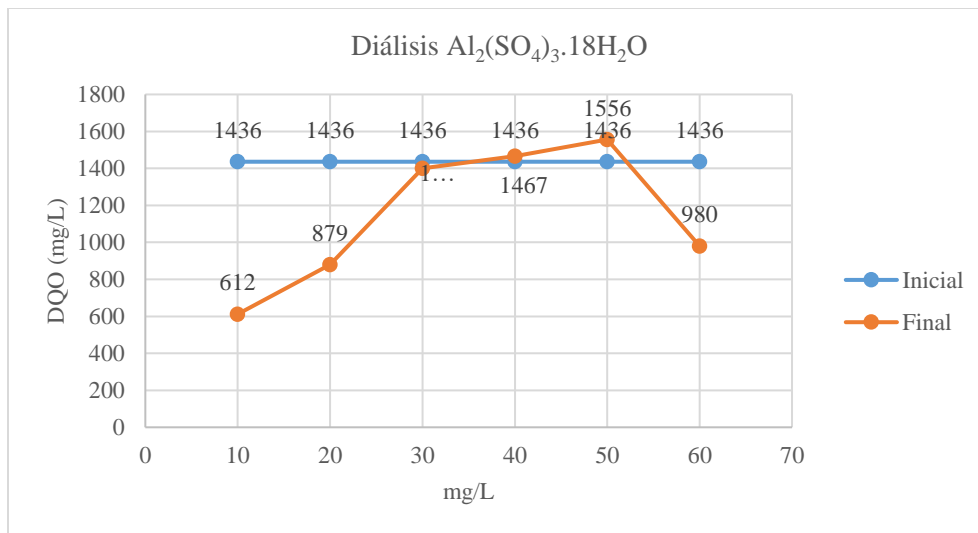


Figura 4. 27 Resultados de DQO para efluente de hemodiálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

En la figura 4.28 y 4.29 se observa el promedio del parámetro de turbiedad y remoción de turbiedad respectivamente; en la que el efluente de diálisis tiene un turbiedad inicial de 15.7 NTU, al añadir el sulfato de aluminio a dosis de 10 y 20 mg/L hay una ligera disminución de este parámetro a 12.25 y 15.7 y para dosis de 30, 40, 50 y 60 mg/L hay un aumento de dicho parámetro, lo cual indica que el coagulante no está trabajando de forma adecuada y no hay remoción de turbiedad, una de las posibles causas es el rango de pH.

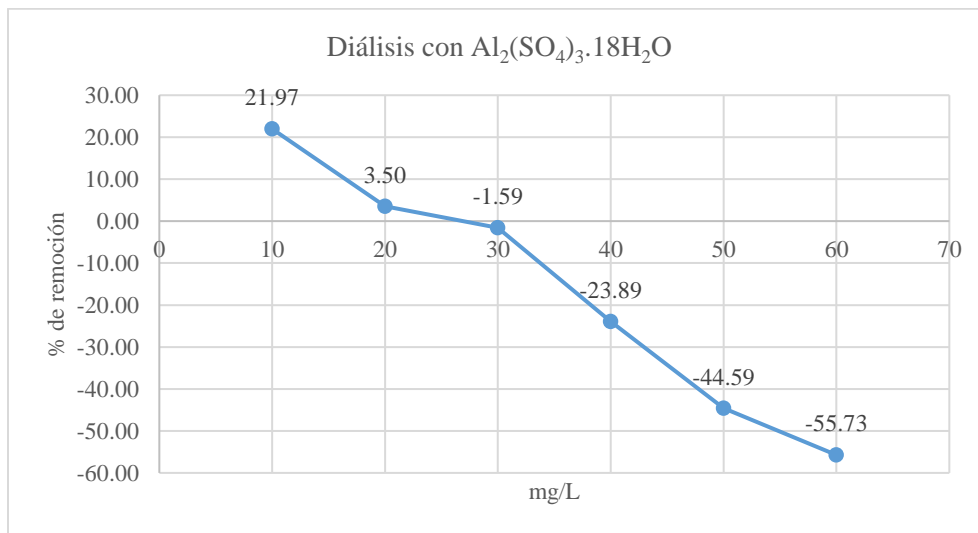


Figura 4. 28 Resultados de % de remoción de turbiedad para efluente de hemodiálisis con $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$

En la figura 4.29 se observa que en rangos menores de dosis de sulfato de aluminio se obtienen mejores resultados que a dosis superiores.

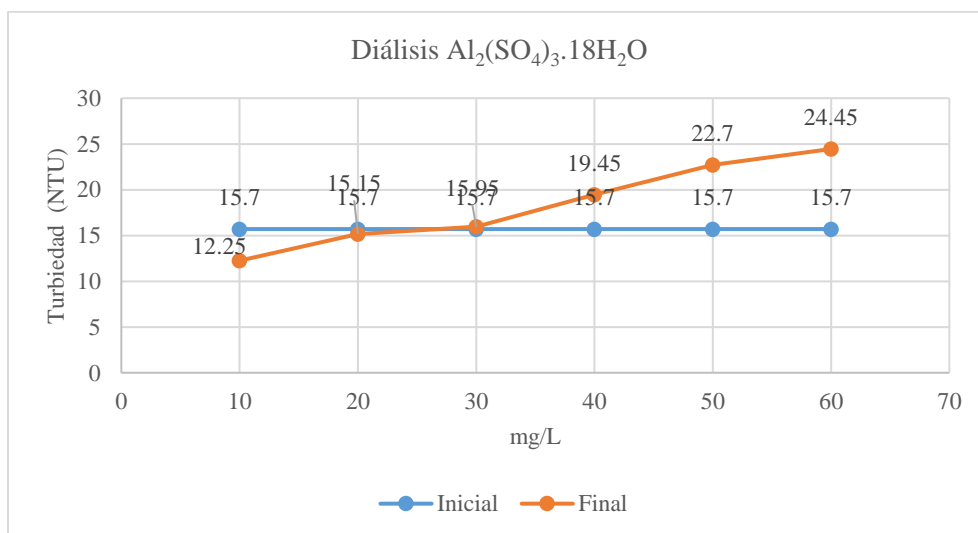


Figura 4. 29 Resultados de turbiedad para efluente de hemodiálisis con $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$

El análisis de varianza para el efluente de diálisis con sulfato de aluminio en la tabla 4.7, se observa el resultado de *p value* de 0.0062 en dicho criterio se establece que si es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se determina que hay diferencias significativas en los tratamientos, por lo tanto, la dosis que se aproxima a ser óptima para el efluente de diálisis con sulfato de aluminio es de 10 mg/L.

Tabla 4. 7 Resultados de ANOVA para diálisis $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

Análisis de varianza					
Respuesta: (%) Remoción de turbidez					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosis	5	221.097	44.219	10.518	0.006253
Residual	6	25.225	4.204		

En la tabla 4.8 al realizar el cruce entre dosis de cada tratamiento para realizar la comparación entre pares, se observa que en las parejas de (60, 50), (50, 40), (30, 20) son iguales, pero para (40, 30) no son iguales, pero si se observa la figura 4.27 en las únicas dosis que presentan remoción de turbiedad son en 10 y 20 mg/L, pero en 10 se identifica la mejor remoción de turbiedad con el 21.97 %.

Tabla 4. 8 Comparaciones de tratamiento por pares Tukey

Dosis	Media	Comparación entre tratamiento			
60	24.45	a			
50	22.7	a	b		
40	19.45		b		
30	15.95				c
20	15.15				c
10	12.25				

4.4.10. Prueba de jarras para el efluente de diálisis con $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

El cloruro férrico se puede trabajar un rango de pH de 4 a 11 unidades, entre sus ventajas es que posee un alto poder de formación de flóculos y sus desventajas son los lodos que se generan llegan a ser corrosivos, tienen un color café oscuro (Campo Chapeña y Tobar Olave, 2011). En otros trabajos como el de Vargas Camareno y Romero Esquivel (2006) mencionan que el rango de pH esta entre 8 a 11. Sin embargo, se efluente de dialisis se encuentra en ambos intervalos como lo mencionan dichos trabajos.

En la figura 4.30, se observa el pH inicial de la muestra para el efluente de diálisis que fue de 8.25. Se sabe que las sales de Fe^{3+} son ácidas (Sarango, 2012) y como resultado al añadir estas sales al efluente disminuye su pH en un intervalo de 7.71 a 8.10.

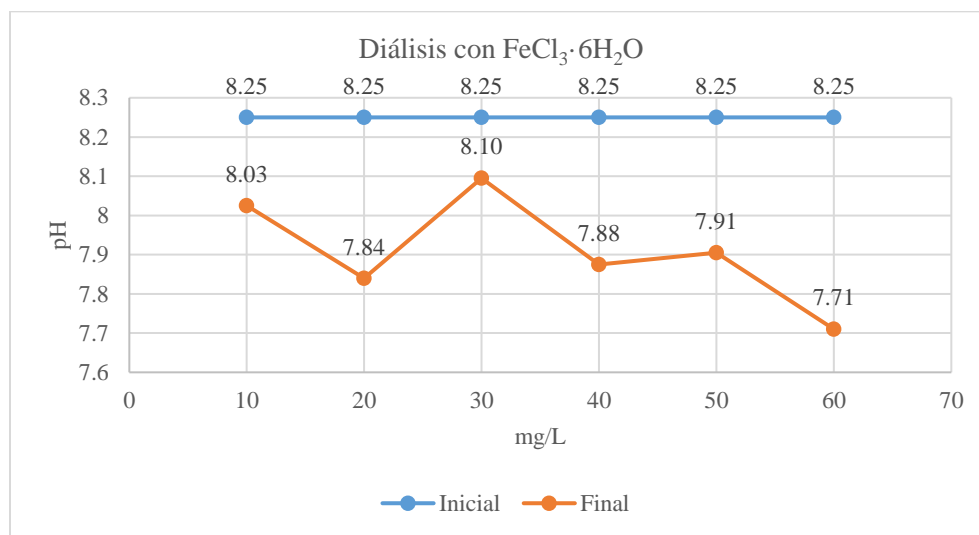


Figura 4. 30 Resultados de pH para el efluente de diálisis con $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

En la figura 4.31, se observa el parámetro de demanda química de oxígeno (DQO), en la cual se examinan los valores disminuyen para el intervalo de 10 y 20 mg/L, pero para el tratamiento en las dosis 30 a 60 mg/L aumenta el parámetro. Otras especies de hierro están presentes, dependiendo del pH. A valores de pH por debajo de 8.0, se encuentran especies solubles son Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ y FeOH^{2+} (Gabelich *et al.*, 2002).

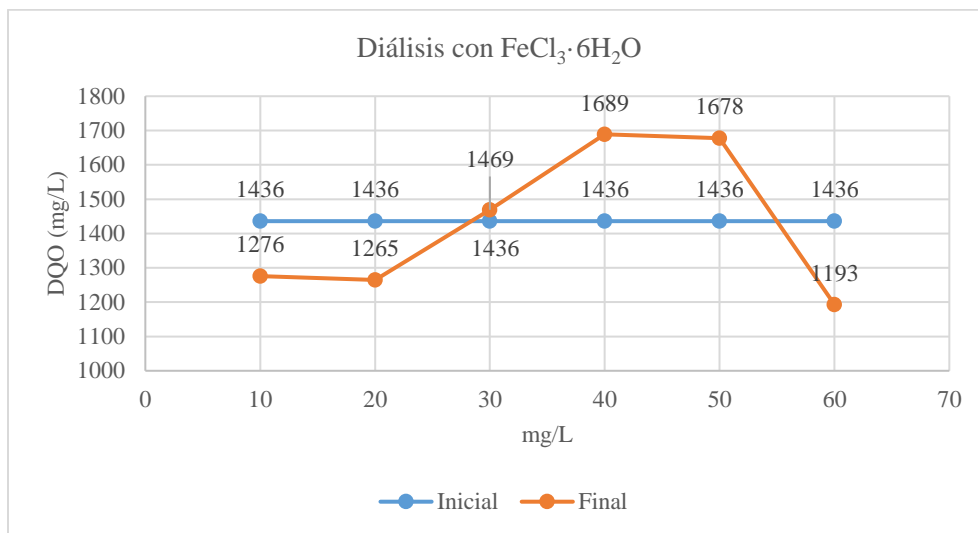


Figura 4. 31 Resultados de DQO para el efluente de diálisis con $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

En la figura 4.32 se observa que no existe remoción de turbiedad en dosis de 20, 30, 40, 50 y 60 mg/L y solo existe una ligera remoción para el intervalo de 10 mg/L.

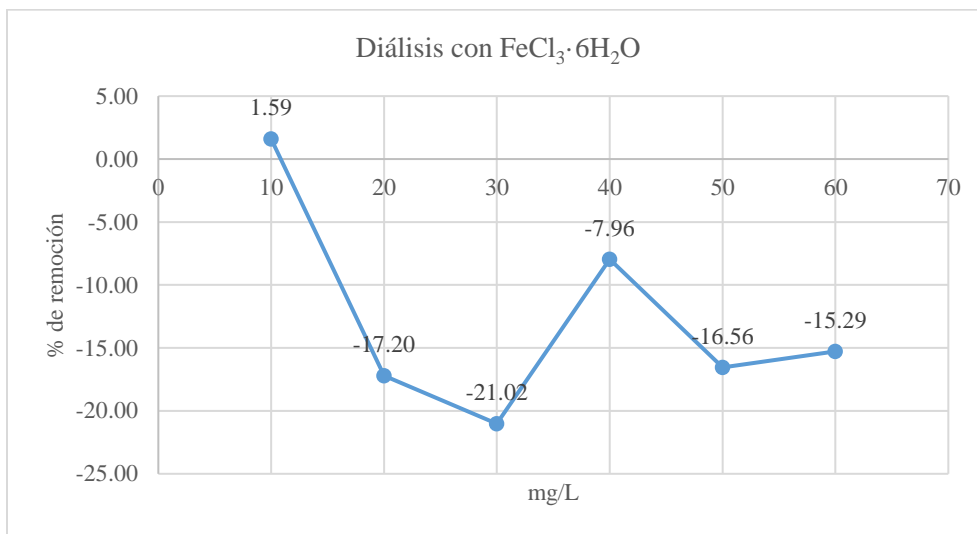


Figura 4. 32 Resultados de % de remoción para el efluente de diálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

De igual forma se puede observar en la figura 4.33 que la turbiedad aumenta y no genera una disminución en dicho parámetro, lo que significa el cloruro de hierro no tuvo eficiencia de remoción para el efluente de diálisis.

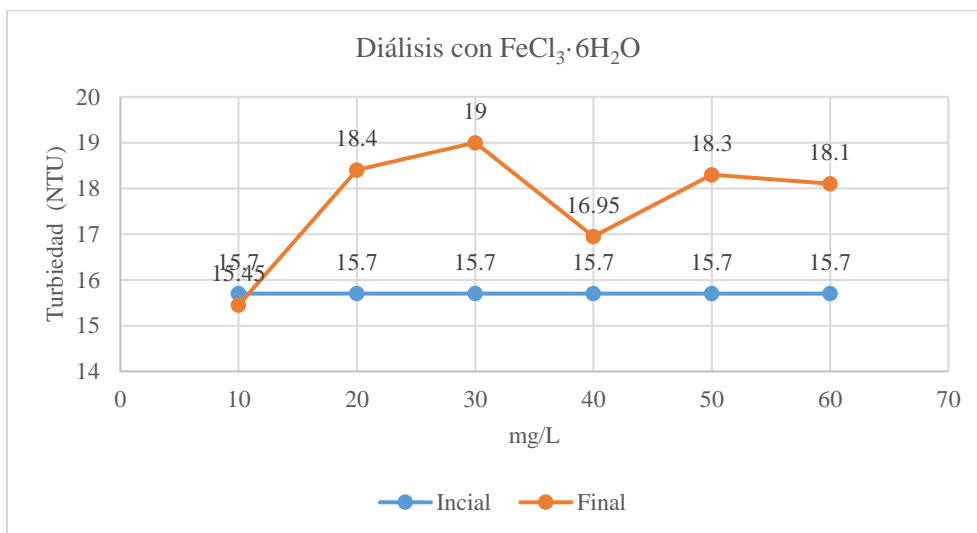


Figura 4. 33 Resultados de turbiedad para el efluente de diálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

En la tabla 4.9 el *pvalue* es de 0.9621 por lo que no se rechaza la hipótesis, lo cual concluye que estas dosis no son aptas para el tratamiento y se debe buscar otro intervalo para verificar la dosis óptima para el efluente de diálisis con cloruro de hierro.

Tabla 4. 9 Resultados de ANOVA para diálisis $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

Análisis de varianza					
Respuesta: (%) Remoción de turbidez					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosis	5	16.65	3.33	0.1756	0.9621
Residual	6	113.79	18.965		

4.4.11. Prueba de jarras para el efluente de hemodiálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

Uno de los coagulantes más utilizados es el sulfato de aluminio, este compuesto al disociarse en agua, sufre una serie de reacciones con los iones alcalinos presentes en el agua, formando iones complejos, polímeros e hidróxido de aluminio insoluble, que pueden ser adsorbidos por las partículas coloidales suspendidas en el agua produciendo la desestabilización de las cargas y favoreciendo la sedimentación de las mismas (Solis Silvan, Laines Canepa and Hernández Barajas, 2012).

El pH inicial de la muestra de hemodiálisis fue de 6.45 que se verifica en la figura 4.34, posiblemente la disminución del pH de la muestra se debió al almacenamiento prolongado, ya que en lotes anteriores el intervalo de pH se encontraba en 7-8. Es importante mencionar que se observa un ascenso de pH al añadir el sulfato de aluminio en un rango de 6.66 a 6.98. Por lo tanto, el control del pH es importante en la coagulación, no solo en la eliminación de turbidez, calidad y color, sino también para mantener niveles mínimos satisfactorios de aluminio residual disuelto en el efluente (Brandt *et al.*, 2017).

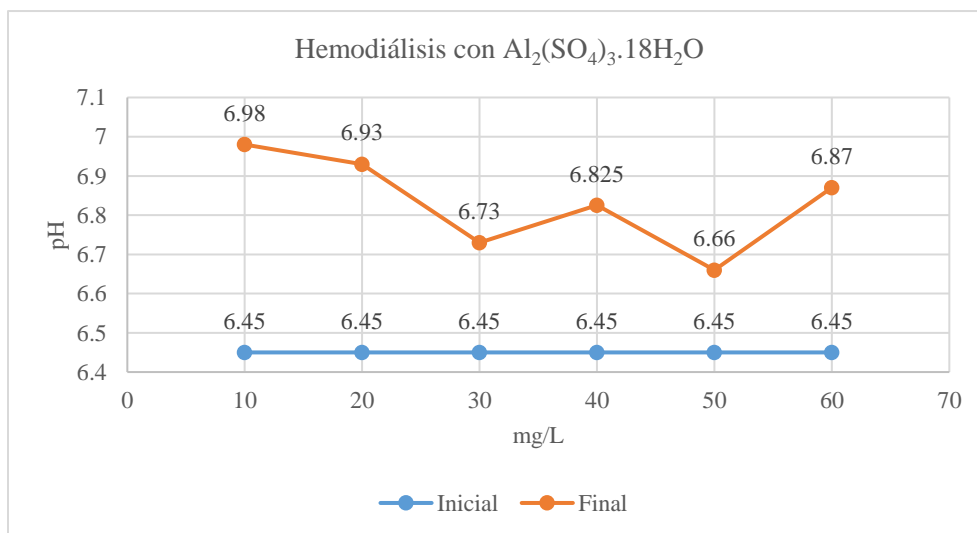


Figura 4. 34 Resultados de pH para el efluente de diálisis con $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

En la gráfica 4.35 se observa la DQO para el efluente de diálisis con sulfato de aluminio inicia con 280 mg/L, en la dosis de 20 mg/L se observa un descenso de dicho parámetro a 189 mg/L.

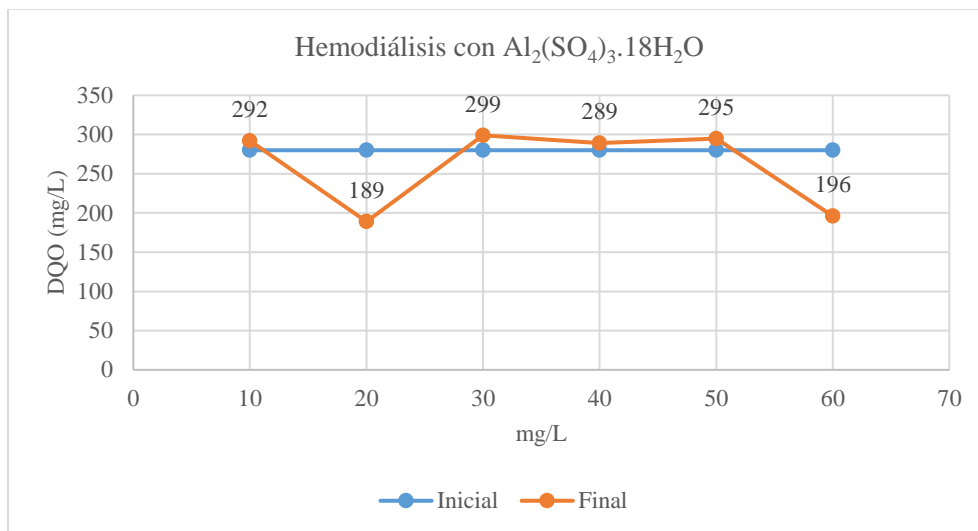


Figura 4. 35 Resultados de DQO para el efluente de diálisis con $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$

El mejor porcentaje de remoción de turbiedad para el efluente de diálisis con sulfato de aluminio se encuentra en la gráfica 4.36 para la dosis de 10 mg/L y 20 mg/L, como se identifica en la figura 4.36.

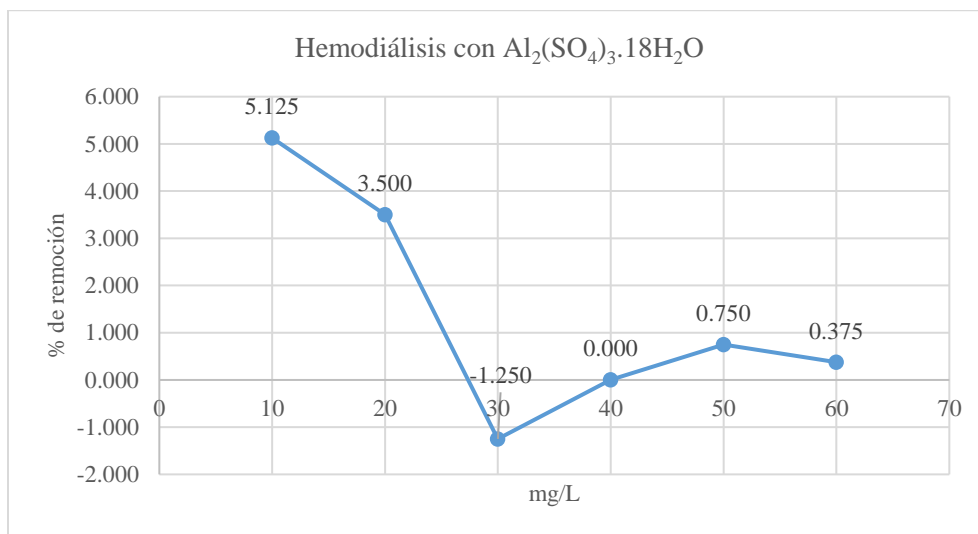


Figura 4. 36 Resultados de % de remoción de turbiedad para el efluente de diálisis con $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$

La mejor dosis se encuentra en el rango de 10 a 20 mg/L obteniendo las mejores disminuciones de turbiedad como se muestra en la gráfica 4.37

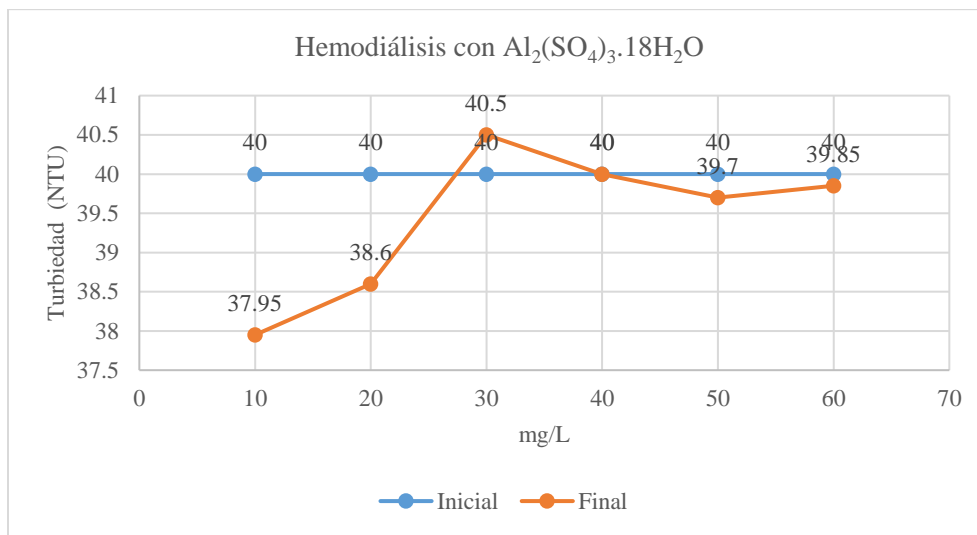


Figura 4. 37 Resultados de turbiedad para el efluente de diálisis con $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$

Como menciona Gabelich *et al.*, 2002, de acuerdo con los diagramas de solubilidad, el aluminio es menos soluble con un pH de 5.7 a 6.2, en el caso del efluente de hemodiálisis se puede observar en la figura 4.36 en donde se visualiza el pH de la muestra está en 6.45, aunque no se encuentra dentro del rango establecido por Gabelich, se observa que está muy próximo lo cual indica que posiblemente el rango de pH influyó para remoción de turbiedad.

Corroborando con el *pvalue* que es de 0.6115 que se observa en la tabla 4.10, se concluye que no hay una diferencia significativa en los tratamientos, por lo que no se rechaza la hipótesis, se comportan de igual manera, lo cual se deduce que se deben evaluar otras dosis para encontrar la adecuada.

Tabla 4. 10 Resultados de ANOVA para hemodiálisis $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$

Análisis de varianza					
Respuesta: (%) Remoción de turbidez					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosis	5	9.1967	1.8393	0.7564	0.6115
Residual	6	14.59	2.4317		

4.4.12. Prueba de jarras para el efluente de hemodiálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

El pH de la muestra al añadir el cloruro de hierro disminuye en las dosis de 10, 20, 30, 40 y 50 mg/L y para 60 mg/L aumenta, como se identifica en la figura 4.38.

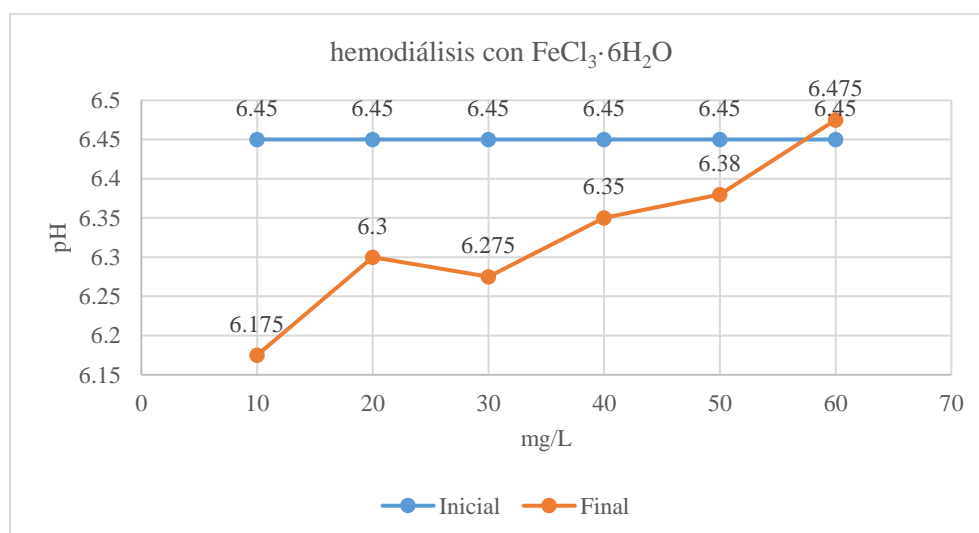


Figura 4. 38 Resultados de pH para el efluente de hemodiálisis con $FeCl_3 \cdot 6H_2O$

En la gráfica 4.39 se observa la DQO para el efluente de hemodiálisis con sulfato de aluminio, en la que se observa una disminución en las dosis de 10 y 20 mg/L y en la de 30, 40, 50 y 60 mg/L se visualiza un aumento de 280 mg/L a 544.5 mg/L.

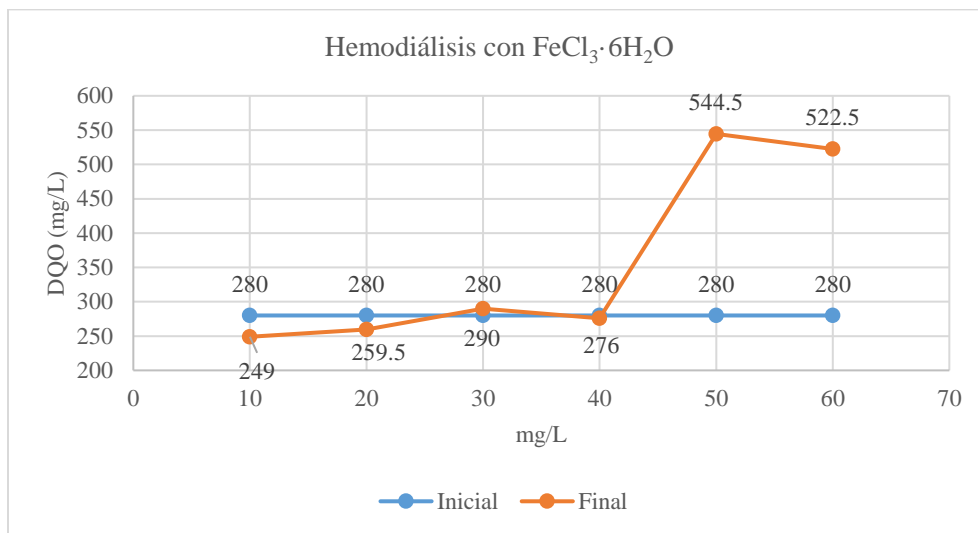


Figura 4. 39 Resultados de DQO para el efluente de hemodiálisis con $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Para la remoción de turbiedad (%) se encuentra una remoción alta a comparación de las demás en 10, 20 y 30 mg/L y para las dosis de, 40,50 y 60 mg/L la remoción de turbiedad de la muestra no es tan elevada como se identifica en la figura 4.40.

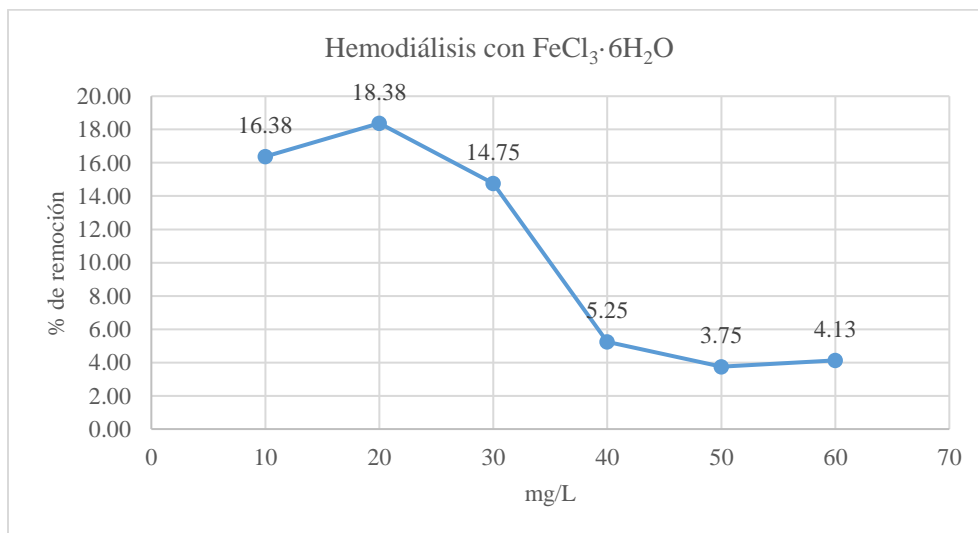


Figura 4. 40 Resultados de % de remoción de turbiedad para el efluente de hemodiálisis con $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Los coagulantes de hierro tienen la ventaja de producir un flóculo más denso que el producido por sulfato de aluminio obteniendo mejores características de asentamiento, tal es el caso del efluente de hemodiálisis con cloruro de hierro. También es importante mencionar que el gasto entre uno y otro va aproximadamente en un 40% de aumento en el peso del lodo de hidróxido en comparación con el sulfato de aluminio (Brandt *et al.*, 2017).

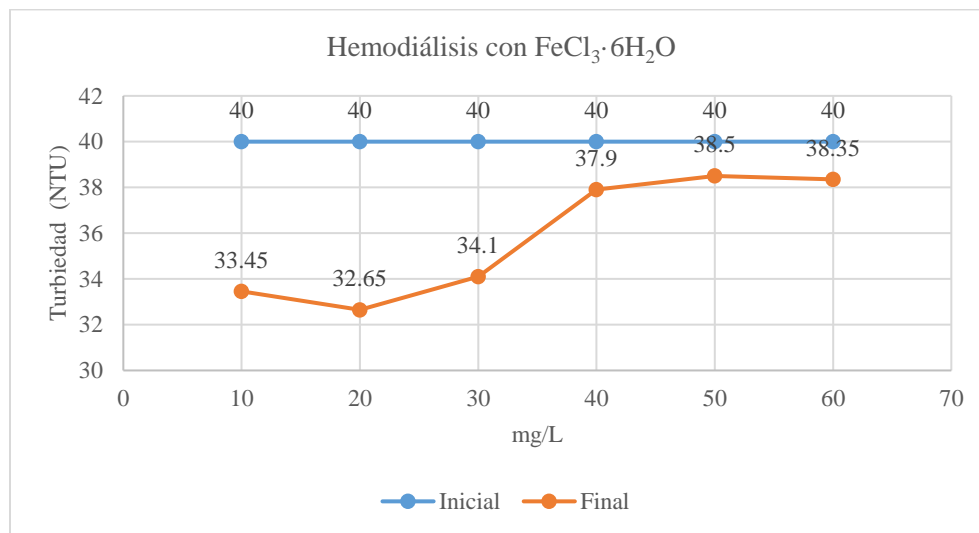


Figura 4. 41 Resultados de turbiedad para el efluente de hemodiálisis con FeCl₃·6H₂O

Para el parámetro de turbiedad se encuentra que existe una diferencia estadísticamente significativa ($p = 4.97 \times 10^{-5}$) para distintos niveles de dosis de cloruro de hierro. En la figura 4.41, se observa que las dosis en donde se presenta una disminución de la turbiedad son en 10, 20 y 30 mg/L

En el análisis de varianza el *pvalue* que es de 4.97×10^{-5} se concluye que hay una diferencia significativa en los tratamientos, por lo que se rechaza la hipótesis, lo cual se infiere que la mejor dosis para dicho tratamiento es de 20 mg/L.

Tabla 4. 11 Resultados de ANOVA para hemodiálisis FeCl₃·6H₂O

Análisis de varianza					
Respuesta: (%) Remoción de turbidez					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Dosis	5	73.067	14.6135	59.445	4.97×10^{-5}
Residual	6	1.475	0.2458		

En la tabla 4.12 al realizar el cruce entre dosis de cada tratamiento para realizar la comparación entre pares, se observa que para (60,50), (50,40), (30,20), son iguales, pero al verificar los resultados obtenidos en la figura 4.40 las mejores remociones de turbiedad se encuentran en 10, 20 y 30 mg/L, lo cual se puede concluir que existe una dosis óptima para dicho tratamiento, la cual se descarta 30 y 20 porque son iguales, quedando así la dosis 10 mg/L como la mejor dosis para dicho tratamiento.

Tabla 4. 12 Comparaciones de dosis en cada tratamiento

Dosis	Media	Comparación entre tratamiento			
60	38.5	a			
50	38.35	a	b		
40	37.9		b		
30	34.1				c
20	33.45				c
10	32.65				

La eficiencia de remoción con el coagulante natural para el efluente de diálisis fue de 42.85% a una dosis óptima de mucilago de nopal de 25 mg/L, mientras que con el sulfato de aluminio 1.59% a una dosis óptima de 10 mg/L, lo que se concluye que se obtiene mejores resultados con el coagulante natural *Opuntia sp.* También se concluye que al utilizar el cloruro de hierro no se obtienen remociones en los intervalos de 10 a 60 mg/L para dicho efluente.

Para el efluente de hemodiálisis la eficiencia de remoción con el coagulante natural es de 21.9% con una dosis óptima de 25 mg/L, así también se evaluó la eficiencia de remoción con el coagulante cloruro de hierro y se obtuvo una dosis óptima de 20 mg/L con el 18.38% de remoción de turbiedad y logró generar mejores remociones a comparación del sulfato de aluminio, en la cual no se observó eficiencia de remoción para el tratamiento.

Es importante mencionar que los cambios rápidos en la composición de los efluentes de diálisis y hemodiálisis pueden ocurrir, desde la alimentación del paciente y edad del paciente juegan un papel clave.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Derivado de la revisión bibliográfica para el establecimiento del estado del arte en cuanto la extracción de mucilago de nopal con el uso de solventes es el procedimiento más utilizado hasta ahora y resulta costoso de realizar, ya que los rendimientos son de aproximadamente del 1%, además por el empleo de sustancias como el alcohol o éter, no es un procedimiento amigable con el ambiente. Por otro lado, si se considera la extracción por el método de *filtrado simple*, los rendimientos encontrados son similares y tienen la ventaja de emplear solamente agua, utilizando el proceso mecánico, por lo que la descarga líquida puede ir directamente al drenaje sin contaminar. La extracción del mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.* es barato, abundante, renovable, simple y estos coagulantes provenientes de recursos naturales no tóxicos y que se consideran un residuo, deben ser alentados a desarrollarse a gran escala.

Con respecto a la investigación sobre la peligrosidad de los efluentes estudiados en esta investigación, se puede mencionar que el efluente derivado del procedimiento de hemodiálisis se realiza por vía venosa y para el tratamiento de diálisis se obtiene en la cavidad peritoneal, es importante puntualizar que en algunas ocasiones el efluente sale con sangre, dando una coloración rojiza, por lo tanto, de acuerdo con la NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, se considera un residuo peligroso biológico-infeccioso (RPBI), pues en ella se establece que la sangre y los componentes de ésta, sólo en su forma líquida, así como los derivados no comerciales, incluyendo las células progenitoras, hematopoyéticas y las fracciones celulares o acelulares de la sangre resultante (hemoderivados), son RPBI. Cabe mencionar que en los países como Italia, España, China, Brasil e India si existe una regulación para la descarga de este tipo de efluentes dado los grandes volúmenes de agua y el número significativo de personas que utilizan dichos tratamientos.

La dosis de coagulante natural (mucilago de nopal de poda *Opuntia sp.*), se probó utilizando el diseño de experimentos completamente al azar y el método de pruebas jarras para los efluentes reales obtenidos de dos hospitales, se encontró dentro de lo reportado en la literatura para aguas residuales. Sin embargo, no se halló que se hubiera aplicado este coagulante

natural en efluentes hospitalarios para la remoción de turbidez. El uso de coagulante natural *Opuntia sp.* representa un desarrollo en la tecnología ambiental ya que se revaloriza un residuo para tratar el agua residual y así cumplir con las condiciones de descarga. En vista de esto, se considera que la aplicación de esta alternativa puede llegar a emplearse en más efluentes hospitalarios antes de que se integren al drenaje.

Así mismo, para la evaluación de la eficiencia de remoción para el efluente de diálisis utilizando el mucilago de nopal fue mejor que utilizar el sulfato de aluminio, y para el efluente de hemodiálisis se detectó que la remoción fue casi igual con dosis similares. No existe comparación estadística, es decir, que cada una se probó por separado, cabe recalcar que las dosis que se probaron fueron puntuales por el tipo de agua que se recolectó, la variabilidad de los datos se debió a diferentes factores, entre ellos el tiempo que se almacenaron los efluentes, también el lote cambio sus propiedades, como se explicó anteriormente, que depende de la edad, alimentación, medicación del paciente.

Finalmente, de la evaluación del uso de mucilago de nopal para el tratamiento de efluentes hospitalarios se puede concluir que si es una buena alternativa para el tratamiento no solo de aguas residuales como se habían tratado anteriormente, sino que también para efluentes de hemodiálisis y diálisis. Es importante mencionar que se está utilizando un residuo que se puede revalorizar, en lugar de desecharlos y no darles ninguna aplicación. Además, se podrían sustituir coagulantes químicos que impactan negativamente por la formación abundante de lodos tóxicos.

RECOMENDACIONES

- ✓ Utilizar el efluente lo más pronto posible para evitar variabilidad en la muestra.
- ✓ Debido a que hay variabilidad en el efluente trabajar con el mismo lote.

ANEXOS

Extracción de mucilago de nopal

Para las pruebas presuntivas en la extracción de mucilago de nopal se tomó en cuenta las metodologías propuestas en la literatura (Majdoub *et al.*, 2001; Urzu *et al.*, 2006; Aliaga, Aceituno y Sa, 2007; Aquino *et al.*, 2009; Ixtafiyuca, 2012; Torres, Carpinteyro y Vaca, 2012; Stebbins *et al.*, 2013; Vargas Rodríguez *et al.*, 2016), con base en eso se consideró la siguiente metodología:

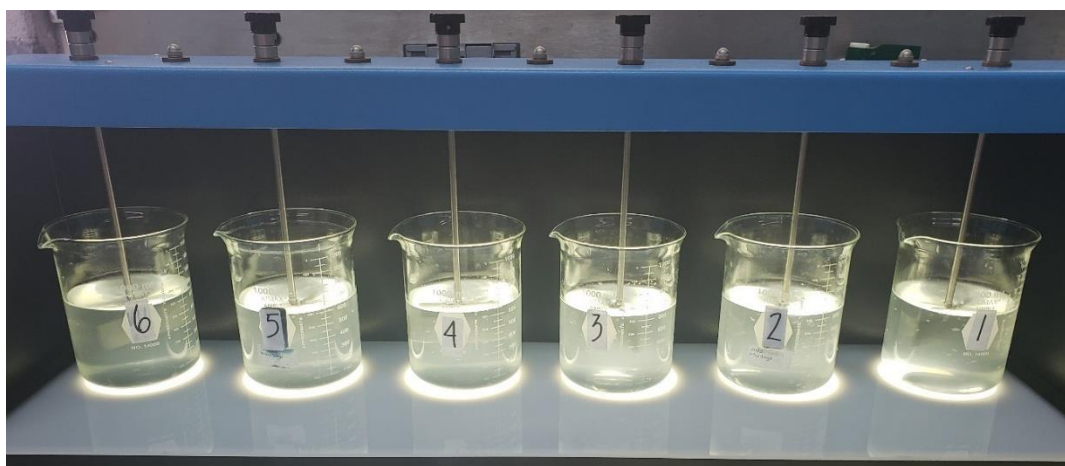
1. Quitar espinas y lavar con agua de grifo
2. Pesar para estimar el rendimiento seco del mucilago
3. Separar la epidermis con un cuchillo, tratando de recuperar la mayor parte de clorénquima y parénquima, que es donde se encuentra la mayor cantidad de células que almacenan el mucilago.
4. Cortar en cubos pequeños
5. Escaldar (cocción): Temperatura = 60° C, tiempo = 10 minutos
6. Macerar: Reposar en el refrigerador T=4°C y t= 24 horas (Cuarto frio).
Relación de tejido (peso): agua (vol.) = 1:5
7. Filtrar: Dejar la solución sin los trozos, para realizar la precipitación.
8. Precipitar la solución acuosa: “Alcohol isopropílico” con una relación. 1:3 (alcohol / agua)
9. Centrifugado por 20 minutos a 500 rpm
10. Secar a 40 ° C para eliminar toda la humedad adquirida en la muestra
11. Pasar a molienda (mortero) el sobrenadante para generar un tamaño de partícula menor



Determinación de dosis óptima mediante el método coagulación- floculación “Prueba de Jarras” por la ASTM D2035-08.

Procedimiento

1. Prender el agitador iniciando con la "mezcla rápida" a 120 rpm.
2. Agregar las dosis de mucilago de nopal de poda a niveles de dosis predeterminados de acuerdo con el diseño de experimentos.
3. Mezclar rápidamente durante aproximadamente 1 minuto después de la adición de mucilago de nopal de poda.
4. Registrar tiempo y velocidad (rpm) de la “mezcla rápida”.
5. Para mantener las partículas de flóculos suspendidas uniformemente durante todo el período se efectúa la “mezcla lenta”, 40 rpm durante 20 minutos.
6. Observar el tiempo para la primera formación visible de flóculos.
7. Registrar el tamaño relativo del flóculo y la velocidad del mezclador (rpm).
8. El tiempo de sedimentación deberá ser aquel en el que las partículas inestables o residuales parecen moverse igualmente hacia arriba y hacia abajo. Después de 15 minutos de asentamiento, observar la aparición de flóculos en el fondo del vaso.
9. Medir la temperatura de la muestra.
10. Retirar con la pipeta un volumen de sobrenadante de la jarra en un punto a la mitad de la profundidad de la muestra, para realizar análisis de turbidez y pH.
11. Anotar resultados en la bitácora de resultados



Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas por la norma NMX-AA-036-SCFI-2001.

Acidez Total:

Es la cantidad de iones hidronio (H_3O^+) en la muestra acuosa y se determina como la capacidad cuantitativa de una muestra de agua para reaccionar con una base fuerte hasta un pH de 8,3.

Procedimiento de acidez total de acuerdo con **NMX-AA-036-SCFI-200** que menciona la determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Para acidez total

1. Verter la muestra de agua de hemodiálisis a un matraz Erlenmeyer de 250 ml.
2. Adicionar 2 gotas de fenolftaleína.
3. Titular con hidróxido de Sodio al 0.02 N, hasta que vire de incoloro a rosa
4. Anotar los mililitros gastados.

Calcular la acidez total como CaCO_3 en mg /L mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Acidez total como } \text{CaCO}_3 \text{ en mg /L} = \frac{((A * B) - (C * D)) * (50) * (1000)}{100}$$

donde:

100 es el volumen de la muestra en mL;

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

B es la normalidad de la disolución de NaOH;

C son los mL de H_2SO_4 utilizados en el tratamiento con peróxido;

D es la normalidad del H_2SO_4 utilizado;

50 es el factor para convertir eq/L a mg CaCO_3 /L, y

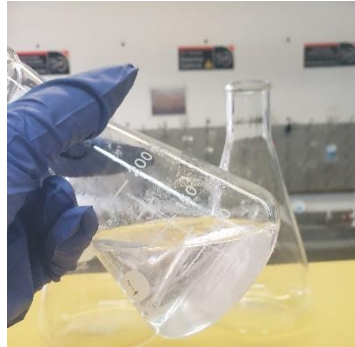
1,000 es el factor para convertir mL a L.



Para alcalinidad:

1. Transferir 100 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
2. Adicionar 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína

3. Titular con la disolución valorada de ácido (0,02 N) hasta el vire de la fenolftaleína (de rosa a incoloro) anotar los mililitros gastados (alcalinidad a la fenolftaleína).



4. Adicionar 2 gotas de la disolución indicadora de naranja de metilo.
5. Continuar con la titulación hasta alcanzar el vire del naranja de metilo. (de canela a amarillo), alcalinidad total.
6. Registrar los volúmenes para ambos puntos finales.
7. Calcular la alcalinidad, tomando en cuenta el vire de los indicadores.



$$\text{Alcalinidad total CaCO}_3 \text{ en mg /L} = \frac{(AXN)}{100} * (50) * (1000)$$

donde:

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

N es la normalidad de la disolución de ácido;

100 es el volumen de la muestra en mL;

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

1 000 es el factor para convertir mL a L.

DQO: Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas NMX-AA-012-SCFI-2001. Método colorimétrico de digestión de reactor de 0-15000 mg/l de DQO.

Procedimiento

1. Agregar 2 ml de la muestra de agua de hemodiálisis a los tubos HACH
2. Agitar hasta homogenizar completamente
3. Reposar durante 2 horas en el digestor a 150° C
4. Reposar hasta que este a temperatura ambiente
5. Leer concentración en el espectrofotómetro HACH a 620 nm, cuando se ajuste la longitud de onda correcta, en la pantalla aparecerá rápidamente: Muestra cero, luego: mg/LCOD HR
6. Poner el blanco, el tubo con agua destilada.
7. Presionar: ZERO. La pantalla mostrará: Puesta a cero...luego:0 mg/L COD HR
8. Limpiar la parte exterior del tubo de muestra con una toalla
9. Presionar: READ. La pantalla mostrará: Leyendo... luego aparecerá el resultado en mg/l de DQO.
10. Comenzar a leer las muestras
11. Anotar las lecturas



Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas por la Norma NMX-AA-028-SCFI-2001.

Procedimiento

Las botellas Winkler contienen 3200 ml cada una para el cálculo se hizo lo siguiente:

2% → 12.8 ml

5% → 32 ml

10% → 64 ml

El agua de dilución se prepara de la siguiente forma:

- Colocar el volumen requerido de agua en un bidón y añadir por cada litro de agua 1 mL de cada una de las siguientes disoluciones: disolución de sulfato de magnesio, disolución de cloruro de calcio, disolución de cloruro y disolución amortiguadora de fosfatos. Cada que se realiza la DBO se debe preparar el agua y se deja burbujear al menos 1 hora para su uso.



Posteriormente se realiza lo siguiente:

1. Medir la cantidad de muestra de acuerdo con la dilución en una probeta graduada de 1 Litro
2. Llenar la probeta de 1 Litro hasta 640 ml
3. Vaciar en las botellas con su duplicado
4. Leer las OD inicial con el medidor HACH. Revisar que el electrodo este hidratado.
 - a. ON. Esperar
 - b. Set up
 - c. Medir
 - d. Apagar



5. Si se realiza la medición por el método yodométrico, realizar los siguientes pasos:
 - a. Para fijar el oxígeno, adicionar a la botella tipo Winkler que contiene la muestra, 2 mL de sulfato manganoso.
 - b. Agregar 2 mL de la disolución alcalina de yoduro-azida.

- c. Tapar la botella tipo Winkler, agitar vigorosamente y dejar sedimentar el precipitado.
- d. Añadir 2 mL de ácido sulfúrico concentrado, volver a tapar y mezclar por inversión hasta completa disolución del precipitado.
- e. Titular 200 mL de la muestra con la disolución estándar de tiosulfato de sodio 0,025 M agregando el almidón hasta el final de la titulación, cuando se alcance un color amarillo pálido.
- f. Continuar hasta la primera desaparición del color azul.

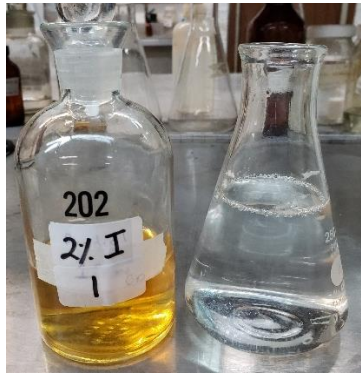
$$OD \text{ mg/L} = \frac{(M \times \text{mL de Tiosulfato} \times 8 \times 1,000)}{98,7}$$

Donde:

M es la molaridad de tiosulfato;

8 son los gramos/ equivalente de oxígeno, y

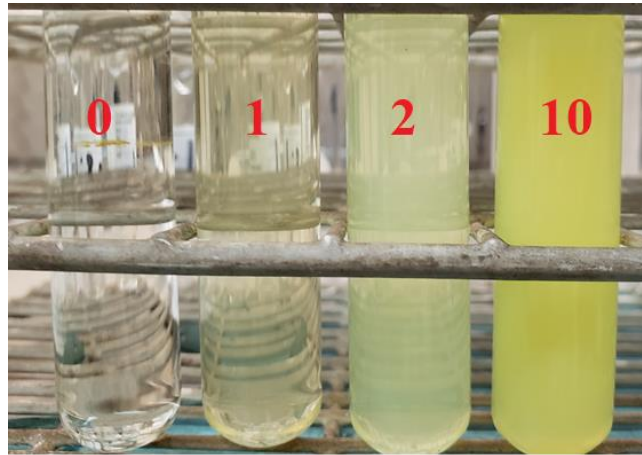
98,7 es el volumen corregido por el desplazamiento de los reactivos agregados a la botella tipo Winkler. Reportar los resultados en mg/L. de OD con la precisión correspondiente.



6. Su duplicado meter a la incubadora a 20° C por 5 días.
7. Leer en 5 días las botellas que se incubaron y medir el OD final.

Determinación de Nitrógeno Amoniacal por Método Nessler HACH 8038

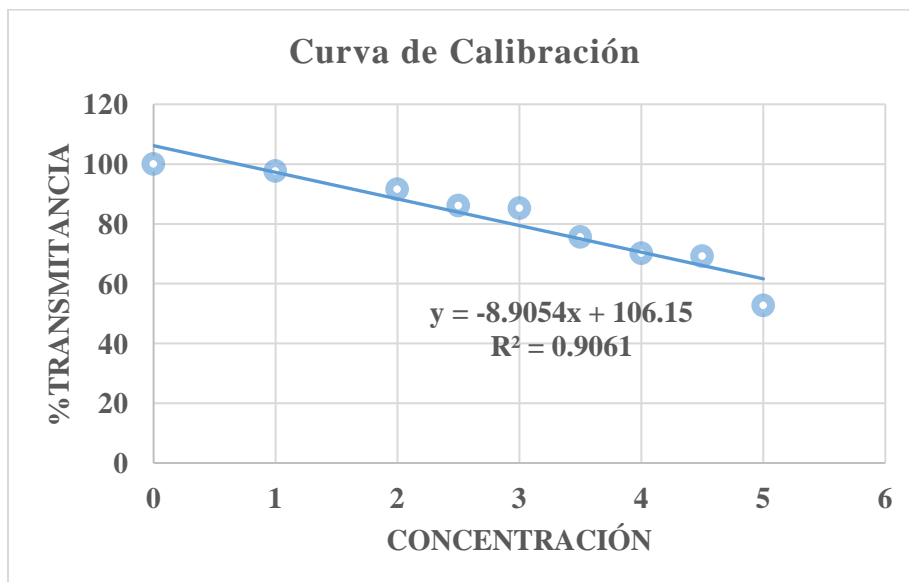
1. Realizar la curva en tubos Nessler para las siguientes concentraciones 0, 1, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 y 5 ml de solución de N-NH₄ (1 ml= 10 µg), de la siguiente forma:
 - a. Aforar a 50 ml con agua destilada y agregar 1 ml de reactivo Nessler.
 - b. Esperar 10 minutos y efectuar las lecturas de transmitancia en el espectrofotómetro.
 - c. Elaborar la curva patrón
2. Vaciar 20 ml de la muestra diluida al 1,2 y 10% al tubo Nessler
3. Aforar a 50 ml con agua destilada y agregar 1 ml de reactivo Nessler.
4. Esperar 10 minutos y efectuar las lecturas de transmitancia en el espectrofotómetro.



Curva de calibración

Curva de calibración

Concentración	% Transmitancia
0	100
1	97.7
2	91.6
2.5	86.1
3	85.2
3.5	75.6
4	70.2
4.5	69.2
5	52.7



Rstudio: Programación de análisis de Varianza (ANOVA) y Tukey

```
trat <-
c(5,5,5,15,15,15,20,20,20,25,25,25,30,30,
30,35,35,35)

y <-
c(42.69,42.24,41.09,41.44,41.86,42.14,41
.81,42.44,41.33,43.07,43.03,42.48,42.53,
41.87,40.53,40.49,40.32,41.91)

trat <- as.factor(trat)

datos <- cbind(trat,y)

m1 <- lm(y ~ trat)

anova(m1) # ANOVA usual

#cálculo de las medias de los tratamientos
ybar <- tapply(y,trat,mean)

ybar

# el valor del cuantil con 95% de
confianza

t <- qt(0.975,8)

Sy <- sqrt(0.1159/3)

LI <- ybar - t*Sy

LS <- ybar + t*Sy

LI;LS

# programa tukey

datos <-
read.table("dia5hemo.txt",header=T)

datos

attach(datos)

Y

Dosis

names(datos)

is.numeric(Y)

is.factor(Dosis)

pf(26.623,5,12,lower.tail=FALSE)

summary(m1)

ybar <- tapply(Y,Dosis,mean)

ybar

# Comparaciones multiples TUKEY

TukeyHSD(aov(Y ~ Dosis))

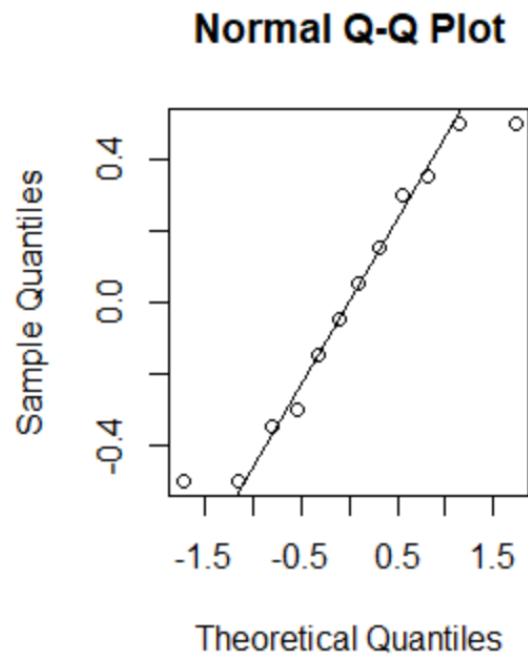
ybarord <- sort(ybar)

ybarord
```

NORMAL Q-Q PLOT

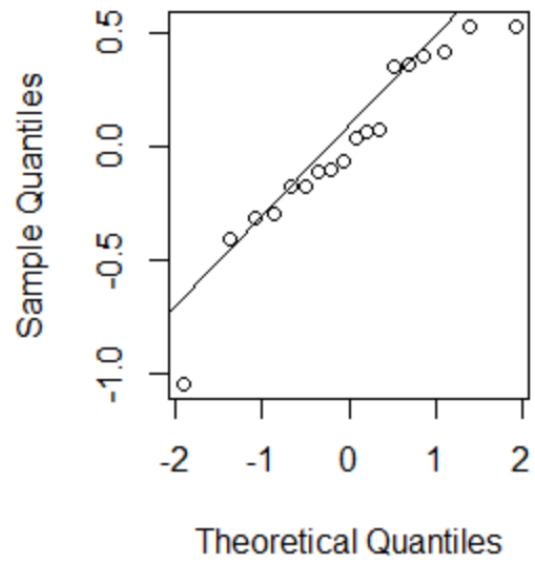
La gráfica de residuales ayuda a determinar si se cumplen los supuestos de los mínimos cuadrados ordinarios.

Mucilago de nopal con efluente de diálisis 5 a 35 mg/L



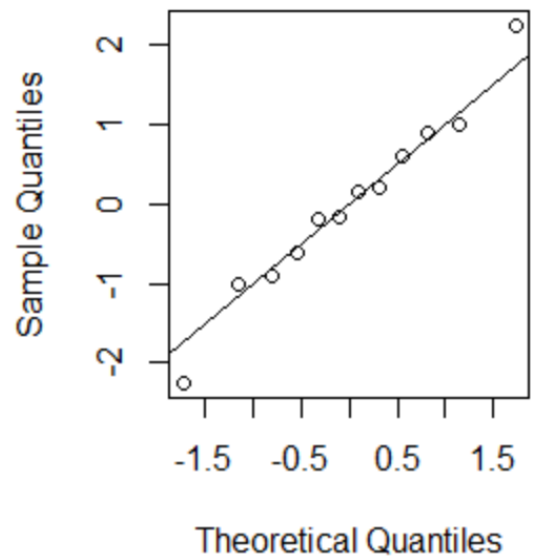
Mucilago de nopal con efluente de hemodiálisis 5 a 35 mg/L

Normal Q-Q Plot



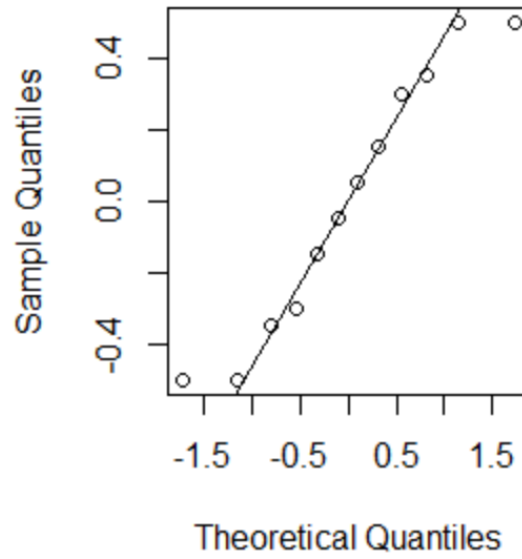
Efluente de hemodiálisis con sulfato de aluminio

Normal Q-Q Plot



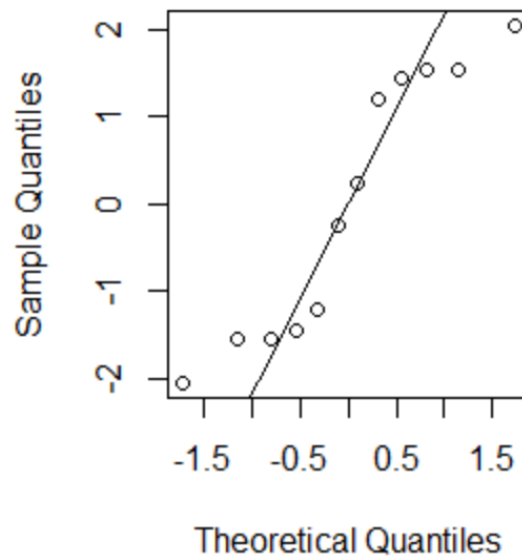
Efluente de hemodiálisis con cloruro de hierro

Normal Q-Q Plot



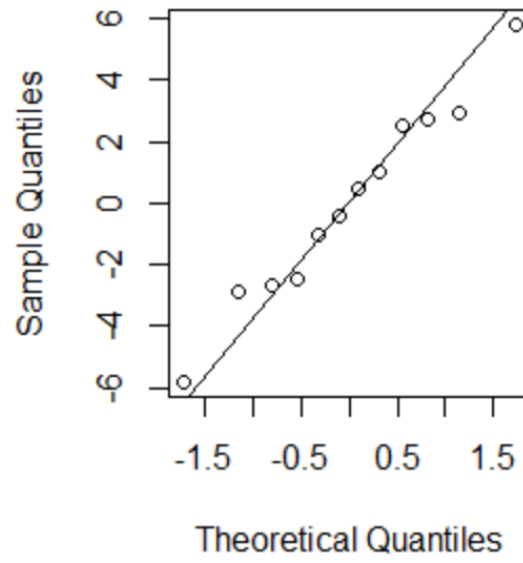
Efluente de diálisis con sulfato de aluminio

Normal Q-Q Plot



Efluente de diálisis con cloruro de hierro

Normal Q-Q Plot



REFERENCIAS

- Abraján, M. (2008) 'Departamento de Tecnología de Alimentos', p. 233.
- Agar, J. W. M. (2012) 'Personal viewpoint: Hemodialysis-water, power, and waste disposal: Rethinking our environmental responsibilities', *Hemodialysis International*, 16(1), pp. 6–10. doi: 10.1111/j.1542-4758.2011.00639. x.
- Aguilar, M. (2002). Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales coagulación-floculación. España: Universidad de Murcia.
- Ahuja, S. S. (2013) Chapter 1 - Monitoring Water Quality, Pollution Assessment, and Remediation to Assure Sustainability, *Monitoring Water Quality*. Elsevier B.V. doi: 10.1016/B978-0-444-59395-5.00001-7.
- AKF. (2019). American Kidney Fund. Obtenido de <https://www.kidneyfund.org/>
- Akin, B. S. (2016) 'Contaminant Properties of Hospital Clinical Laboratory Wastewater: A Physiochemical and Microbiological Assessment', *Journal of Environmental Protection*, 07(05), pp. 635–642. doi: 10.4236/jep.2016.75057.
- Aliaga *et al.* (2007) 'Extraction and characterization of mucilage in', 68, pp. 534–545. doi: 10.1016/j.jaridenv.2006.08.001.
- Ángeles *et al.* (2011) Protocols for engagement and starting of plants of water treatment for hemodialysis', 49(3), pp. 410–419.
- Aquino *et al.* (2009) 'Inhibición del oscurecimiento con mucilago de nopal (*Opuntia ficus indica*) en el secado se plátano', *información tecnológica*, 20(4), pp. 15–20. doi: 10.1612/inf.tecnol.4082it.08.
- Arce Moguel *et al.* (2018) 'Gasto familiar del tratamiento con hemodiálisis en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, para población abierta y afiliada a los servicios de salud', *Población y Salud en Mesoamérica*, 1(1). doi: 10.15517/psm. v1i1.30937.
- Ávila *et al.* (2010) 'Estimación del tamaño óptimo de una unidad de hemodiálisis con base en el potencial de su infraestructura', *Salud Publica de México*, 52(4), pp. 315–323.
- ASTM D2035-19, Práctica estándar para la prueba en tarro de coagulación-floculación del agua, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org
- Basri, M. B. (2014) 'POTENTIAL STUDY OF REGENERATING WASTE DIALYZER', (July).
- Becerra, A. T. (2013). Hemodiálisis esquemática. México: Prado S.A. de C.V.
- Binnie, C. (2009). Basic water treatment. USA: Thomas Telford.

- Bolto, B. A. (2006) 'Chapter 5: Coagulation and flocculation with organic polyelectrolytes', *Interface Science and Technology*, 10(C), pp. 63–88. doi: 10.1016/S1573-4285(06)80074-8.
- Bouatay, F. and Mhenni, F. (2014) 'Use of the cactus cladodes mucilage (*Opuntia ficus indica*) as an eco-friendly flocculants: Process development and optimization using stastical analysis', *International Journal of Environmental Research*, 8(4), pp. 1295–1308. doi: 10.22059/ijer.2014.822.
- Brandt, M. J. et al. (2017) *Storage, Clarification and Chemical Treatment*, Twort's Water Supply. doi: 10.1016/b978-0-08-100025-0.00008-9.
- Buttice *et al.* (2014) *Sediment Removal with the Opuntia ficus-indica Cactus: A Water Purification Method for Communities in Latin America*, *Comprehensive Water Quality and Purification*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/B978-0-12-382182-9.00007-4.
- Cai, W. (2008) 'Extraction , purification , and characterization of the polysaccharides from *Opuntia milpa alta*', 71, pp. 403–410. doi: 10.1016/j.carbpol.2007.06.008.
- Carraro, E. *et al.* (2016) 'Hospital effluents management: Chemical, physical, microbiological risks and legislation in different countries', *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 168, pp. 185–199. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.11.021.
- Casiday (2019). *Treating the Public Water Supply: ¿What is in your water, and how is it made safe to drink?* Obtenido de Departamento de Química de la Universidad de Washington:
<http://www.chemistry.wustl.edu/~edudev/LabTutorials/Water/PublicWaterSupply/PublicWaterSupply.html>
- Chaguay (2017). *Propuesta de tratamiento del manejo de aguas residuales generadas en una unidad diálisis*. Ecuador: Universidad de Guayaquil.
- Choque *et al.* (2018) 'Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua', *Tecnología Química*, 38(2), pp. 298–309. doi: 10.1590/2224-6185.2018.2.
- Cabrera (2009) 'Estudio del proceso de coagulación-floculación de aguas residuales de la empresa textil desembarco del Granma a Escala De Laboratorio', *Tecnología Química*, XXIX (3), pp. 64–73. doi: 10.1590/2224-6185.2009.3.
- CONAGUA. (2009). *Cuido el agua*. Obtenido de <http://www.cuidoelagua.org/inicio.html>
- Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA (2011) 'Resolução N° 430, De 13 De Maio De 2011', p. 8. Available at: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>.
- Cruz (2017). *Método alternativo para tratar lixiviados maduros mediante el proceso de coagulación-floculación con mucílago de Opuntia ficus-indica*. México: UNAM.

- Cuevas-Budhart, M. *et al.* (2019) 'Factores asociados al desarrollo de eventos adversos en pacientes con hemodiálisis en Guerrero, México', 22(1), pp. 42–50.
- Deshmukh *et al.* (2018) 'Wastewater treatment using bio-coagulant as cactus opuntia ficus indica', (January), pp. 15–16. doi: 10.13140/RG.2.2.28932.99202.
- Dovletoglou *et al.* (2002) 'Coagulation for treatment of paint industry wastewater', Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 37(7), pp. 1361–1377. doi: 10.1081/ESE-120005992.
- Elena, L. and Gazabón, M. (2013) 'Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago', 8(1), pp. 19–27.
- Equipo RStudio (2020). RStudio: Desarrollo integrado para R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Flórez, C. *et al.* (2011) 'Clarificación del agua usando coagulantes polimerizados', Dyna, 78(165), pp. 18–27. Available at: <http://www.redalyc.org/pdf/496/49622372002.pdf>.
- FMR. (2012). Fundación Mexicana del Riñón A.C. Obtenido de FMR: <https://fundrenal.org.mx/erc.html>
- Foldeny (2007) 'Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento-diseño de plantas potabilizadoras tipo tecnología simplificada', p. 329.
- Fox (2011) 'Cactus Mucilage-Assisted Heavy Metal Separation: Design and Implementation', p. 148. Available at: <http://libproxy.lib.unc.edu/login?url=http://search.proquest.com/docview/1171873535?accountid=14244>.
- Fuentes *et al.* (2011) 'Effectiveness of a coagulant extracted from *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb in water purification', Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia, 34(1), pp. 039–047.
- Gabelich, C. J. *et al.* (2002) 'Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance', Desalination, 150(1), pp. 15–30. doi: 10.1016/S0011-9164(02)00926-8.
- Giordani *et al.* (2008) 'Factibilidad del uso de polímeros para la clarificación del agua potable en la ciudad de Mérida.', Creando, 0(0), pp. 97–107.
- Goycoolea *et al.* (2003) 'Pectins from *Opuntia* spp.: A short review', Journal of the Professional Association for Cactus Development, 5(February 2003), pp. 17–29.
- Guevara-Figueroa, T. *et al.* (2010) 'Journal of Food Composition and Analysis Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp.)', 23, pp. 525–532. doi: 10.1016/j.jfca.2009.12.003.

- H. Gutiérrez *et al.* (2012). Análisis y diseño de experimentos. Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- Howe, E. S. (1965) 'Uncertainty and other associative correlates of ogood's D4', *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 4(6), pp. 498–509. doi: 10.1016/S0022-5371(65)80049-4.
- Ibarra-Rodríguez, D. *et al.* (2017) 'Capacity of "nopal" pectin as a dual coagulant-flocculant agent for heavy metals removal', *Chemical Engineering Journal*, 323, pp. 19–28. doi: 10.1016/j.cej.2017.04.087.
- Ixtafíayuca, D. S. T. (2012) 'Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete"', 11, pp. 52–62.
- Jaouadi, M. and Amdouni, N. (2013) 'COAGULATION TREATMENT BY Al₂(SO₄)₃ AND RESIDUAL Al DETERMINATION IN MEDJERDA WATER DAM (TUNISIA)', *Journal de la Société Chimique de Tunisie*, 15, pp. 175–181.
- Johnson, C. (2014) *Advances in Pretreatment and Clarification Technologies, Comprehensive Water Quality and Purification*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/B978-0-12-382182-9.00029-3.
- Llano, B. A. *et al.* (2014) 'Tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio de arcillas y alternativas de uso de los lodos generados en el proceso', *Información tecnológica*, 25(3), pp. 73–82. doi: 10.4067/S0718-07642014000300010.
- López Y López, L. R. *et al.* (2017) 'Calidad de vida en hemodiálisis y diálisis peritoneal tras cuatro años de tratamiento', *Medicina Interna de México*, 33(2), pp. 177–184.
- Machado, C. K. *et al.* (2014) 'Potential environmental toxicity from hemodialysis effluent', *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Elsevier, 102(1), pp. 42–47. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.01.009.
- Majdoub, H. *et al.* (2001) 'Prickly pear nopals pectin from *Opuntia* ® *cus-indica* physico-chemical study in dilute and semi-dilute solutions', 46.
- Manuela, M. and Chaguay, D. (2017) UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL.
- Manunza, B. *et al.* (1997) 'Molecular dynamics study of polygalacturonic acid chains in aqueous solution', *Carbohydrate Research*, 300(1), pp. 85–88. doi: 10.1016/S0008-6215(97)00027-X.
- Martínez-González, J. C. *et al.* (2001) 'Poda y época de despunte en cladodios de nopal tunero', *Agrocencia*, 35(2), pp. 159–167.

- Medina-torres, L. *et al.* (2000) ‘Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*)’, 14, pp. 417–424.
- Miller SM, Fugate EJ, Craver VO, Smith JA, Zimmerman JB. Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environ Sci Technol.* 2008;42(12):4274-4279. doi:10.1021/es7025054
- Mukhtar, A., Ali, W. and Hussain, G. (2015) ‘A preliminary study of *Opuntia stricta* as a coagulant for turbidity removal in surface waters’, *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences*, 52(2), pp. 117–124.
- Nawel, A. *et al.* (2015) ‘Improvement of electrocoagulation – electroflotation treatment of effluent by addition of *Opuntia ficus indica* pad juice’, *SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY*. Elsevier B.V., 144, pp. 168–176. doi: 10.1016/j.seppur.2015.02.018.
- Nharingo, T. and Moyo, M. (2016) ‘Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewaters . A critical review’, *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 166, pp. 55–72. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.10.005.
- Nharingo *et al.* (2015) ‘Exploring the use of cactus *Opuntia ficus indica* in the biocoagulation–flocculation of Pb(II) ions from wastewaters’, *International Journal of Environmental Science and Technology*. Springer Berlin Heidelberg, 12(12), pp. 3791–3802. doi: 10.1007/s13762-015-0815-0.
- NIDDK. (Julio de 2007). National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Obtenido de <https://www.niddk.nih.gov/>
- Oladoja, N. A. (2016) ‘Advances in the quest for substitute for synthetic organic polyelectrolytes as coagulant aid in water and wastewater treatment operations’, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. Elsevier, 3, pp. 47–58. doi: 10.1016/j.scp.2016.04.001.
- Olivero Verbe, R. E. *et al.* (2014) ‘Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas’, *Avances Investigación en Ingeniería*, 11(1), p. 70. doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.302.
- OPS. (10 de marzo de 2015). Organización Panamericana de la Salud. Obtenido de OPS: https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=10542:2015-opsoms-sociedad-latinoamericana-nefrologia-enfermedad-renal-mejorar-tratamiento&Itemid=1926&lang=en
- Paz, *et al.* (2012) ‘Aguas residuales de un Centro Hospitalario de Buenos Aires’, 88(28051), pp. 8–9. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228912200_Aguas_residuales_de_un_cen

tro_hospitalario_de_Buenos_Aires_Argentina_caracteristicas_quimicas_biologicas_y_toxicologicas.

- Pichler, T., Young, K. and Alcantar, N. (2012) 'Eliminating turbidity in drinking water using the mucilage of a common cactus', *Water Science and Technology: Water Supply*, 12(2), pp. 179–186. doi: 10.2166/ws.2012.126.
- R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rajasulochana, P. and Preethy, V. (2016) 'Comparison on efficiency of various techniques in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review', *Resource-Efficient Technologies*. Elsevier B.V., 2(4), pp. 175–184. doi: 10.1016/j.reffit.2016.09.004.
- Ramírez Arcila, H. and Jaramillo Peralta, J. (2016) 'Agentes Naturales como Alternativa para el Tratamiento del Agua', *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), p. 136. doi: 10.18359/rfcb.1303.
- Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua (1AD) 'Planta Potabilizadora Para Comunidades Rurales: Optimización De La Coagulación-', *Agua potable para comunidades rurales, reúso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*, pp. 55–67.
- Reyes-Ocampo, I. et al. (2019) 'Solvent-free mechanical extraction of *Opuntia ficus-indica* mucilage', *Journal of Food Process Engineering*, 42(1), pp. 1–9. doi: 10.1111/jfpe.12954.
- Rivas, S., Menés, G. and Rómulo, A. (2017) 'Tratamiento por coagulación-floculación a efluente de la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara', *Tecnología Química*, XXXVII (2), pp. 195–205. Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445551175003>.
- Rodríguez-González, S. *et al.* (2011) 'Optimización de la extracción del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*)', XIV Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, (2004), p. 58240.
- Rodríguez-González, S. et al. (2014) 'Extraction and characterization of mucilage from wild species of opuntia', *Journal of Food Process Engineering*, 37(3), pp. 285–292. doi: 10.1111/jfpe.12084.
- Romero, Patricia (2020) 'Apuntes de diseño estadístico de experimentos', Departamento de Probabilidad y Estadística del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas. Disponible en: http://www.dpye.iimas.unam.mx/patricia/indexer/completamente_al_azar

- Rzedowski, e. a. (2005). Flora fanerogámica del Valle de México. Pátzcuaro, Michoacán: Instituto de Ecología.
- Sáenz, C. (2018) Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal, Boletín De Servicios Agrícolas De La Fao. Available at: <http://www.fao.org/3/i7628es/I7628ES.pdf>.
- Saleem, M. and Bachmann, R. T. (2019) 'Journal of Industrial and Engineering Chemistry A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment', Journal of Industrial and Engineering Chemistry. The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry, 72, pp. 281–297. doi: 10.1016/j.jiec.2018.12.029.
- Sellami, M. *et al.* (2014) 'Cactus juice as bioflocculant in the coagulation-flocculation process for industrial wastewater treatment: A comparative study with polyacrylamide', Water Science and Technology, 70(7), pp. 1175–1181. doi: 10.2166/wst.2014.328.
- Sánchez-García, A., Zavala-Méndez, M. C. and Pérez-Pérez, A. (2012) 'Hemodiálisis: proceso no exento de complicaciones', 20(3), pp. 131–137.
- Santiago, D. *et al.* (2012) 'Evaluación del cloruro férrico como coagulante en el proceso de potabilización', Ciencia, 20(1), pp. 43–51.
- Sarango, D. (2012) 'Estudio de la influencia de la adición de cloruro férrico en la sedimentabilidad de los fangos activados.', (Iii), p. 195. Available at: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17975/TFM PAOLA DUQUE.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17975/TFM_PAOLA_DUQUE.pdf?sequence=1).
- Solís Silvan, R., Laines Canepa, J. R. and Hernández Barajas, J. R. (2012) 'Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales', Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 28(3), pp. 229–236.
- Stebbins, D. *et al.* (2013) Cactus Mucilage as an Emergency Response Biomaterial to Provide Clean Drinking Water, Monitoring Water Quality. Elsevier B.V. doi: 10.1016/B978-0-444-59395-5.00010-8.
- Suárez López, J., Jácome Burgos, A. and Ures Rodríguez, P. (2014) 'Fichas técnicas de etapas de proceso de PTR de agua industrial textil. Coagulación Floculación', Inditex, pp. 6–24. doi: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Coagulaci%C3%B3n-floculaci%C3%B3n.pdf/b59be3a9-558c-62c3-66e1-d89f82e3aae7>.
- Tarrass, F., Benjelloun, M. and Benjelloun, O. (2008) 'Recycling Wastewater After Hemodialysis: An Environmental Analysis', 52(1), pp. 154–158. doi: 10.1053/j.ajkd.2008.03.022.

- Torres, L. G., Carpinteyro-urban, S. L. and Vaca, M. (2012) 'Use of prosopis laevigata seed gum and opuntia ficus-indica mucilage for the treatment of municipal wastewaters by coagulation-flocculation', 2012, pp. 35–41.
- Trujillo, D. *et al.* (2014) 'Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano', *Revista Ion*, 27(1), pp. 17–34.
- Universidad Central de Las Villas, M. *et al.* (2017) 'Selección de programa químico de tratamiento para aguas residuales oleosas', *Centro Azúcar*, 44(2), pp. 89–100. Available at: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612017000200010.
- Urzu, C. C. *et al.* (2006) 'Chemical characterization of the mucilage from fruits of Opuntia ficus indica', 63, pp. 263–267. doi: 10.1016/j.carbpol.2005.08.062.
- Vargas Camareno, M. and Romero Esquivel, L. (2006) 'Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica', *Tecnología en Marcha*, 19(4), pp. 37–41.
- Vargas Rodríguez, L. *et al.* (2016) 'Physical properties of mucilage prickly pear', *Acta Universitaria*, 26(NE-1), pp. 8–11. doi: 10.15174/au.2016.839.
- Vázquez, J. L. *et al.* (2012) *De Nopal Tunero En El Altiplano Potosino*.
- Veliz, E. and Guadalupe, J. (2016) 'Filtración del agua residual para la reutilización', *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), pp. 17–34. Available at: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222016000100017&script=sci_arttext.
- Villabona, A., Paz, I. and Martínez, J. (2013) 'Caracterización de la Opuntia ficus-indica para su uso como coagulante natural Characterization of Opuntia ficus-indica for using as a natural coagulant', *Rev. Colomb. Biotecnol.*, XV(1), pp. 137–144.
- Wei, H. *et al.* (2018) 'Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review', *Water Research*. Elsevier Ltd., 143(2015), pp. 608–631. doi: 10.1016/j.watres.2018.07.029.
- Yahia, E. M., Ornelas, J. D. J. and Anaya, A. (2009) 'Extraction and chemical characteristics of mucilage from mesquite, aloe vera , maguey and prickly pear cactus cladodes (Nopal) and Evaluation of Its Prebiotic Effect on the Growth of 2 Probiotic Bacteria', pp. 625–628.
- Yang, Y. C. *et al.* (2007) 'Turbidity removal from surface water and landfill leachate using cactus *Opuntia*', 68(1), pp. 61–64.
- Yeun, J. Y. and Depner, T. A. (2005) *Principles of hemodialysis. fourth edi, chronic kidney disease, dialysis, & transplantation. Fourth Edi.* Elsevier Inc. doi: 10.1016/B978-1-4160-0158-4.50020-3.

- Yin, C. (2010) 'Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment', *Process Biochemistry*. Elsevier Ltd., 45(9), pp. 1437–1444. doi: 10.1016/j.procbio.2010.05.030.
- Yolanda Andía Cárdenas *et al.* (2000) 'Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico. tratamiento de agua: coagulación floculación'. Available at: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/andia.pdf>.
- Zerbatto, M. *et al.* (2009) 'Cloruro Férrico para la coagulación optimizada y remoción de entero parásitos en agua', pp. 18–26.
- Zhang, J. *et al.* (2006) 'A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment', *Process Biochemistry*, 41(3), pp. 730–733. doi: 10.1016/j.procbio.2005.08.016.