

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas
Escuela Profesional de Ingeniería Biotecnológica



Evaluación de un biocoagulante compuesto por mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano como pretratamiento de lactosuero

Tesis presentada por el Bachiller:

Hinojosa Chacon, Boris Irving

ORCID: 0009-0001-5418-6491

para optar el Título Profesional de Ingeniero Biotecnólogo

Asesor:

Dr. Jiménez Pacheco, Hugo Guillermo

ORCID: 0009-0001-5177-1126

Arequipa - Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA BIOTECNOLOGICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 09 de Julio del 2025

Dictamen: 009455-C-EPIB-2025

Visto el borrador del expediente 009455, presentado por:

2016801121 - HINOJOSA CHACON BORIS IRVING

Titulado:

EVALUACIÓN DE UN BIOCOAGULANTE COMPUESTO POR MUCÍLAGO DE NOPAL (OPUNTIA FICUS INDICA) Y QUITOSANO COMO PRETRATAMIENTO DE LACTOSUERO

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO BIOTECNOLOGO

**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR**



**43085216 - MEDINA CABRERA EDILBERTO VICENTE
DICTAMINADOR**



**47176599 - ANCCO MAMANI MIDWAR ROLY
DICTAMINADOR**



Evaluación de un biocoagulante compuesto por mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano como pretratamiento de lactosuero

INFORME DE ORIGINALIDAD

11 %

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1 %
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1 %
3	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	1 %
4	riaa.uaem.mx:8080 Fuente de Internet	<1 %
5	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
6	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
7	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	<1 %
8	eprints.uanl.mx Fuente de Internet	<1 %

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado para todas aquellas personas que considero importantes en mi vida: mis padres, hermanos, sobrino y novia.



AGRADECIMIENTOS

Estoy agradecido en primer lugar con la vida misma, la cual me ha permitido aprender lecciones valiosas hasta este punto de mi existencia. Muchas eventualidades se seguirán presentando y estaré ahí dispuesto a hacerles frente.

Empezando por mi entorno familiar y más íntimo, quisiera agradecerles en primer lugar a mis padres Alberto y Marcela, pues ellos me inculcaron los valores y principios más básicos que un ser humano en estos tiempos debería de integrar en su vida, contribuyendo así en gran medida a ser la persona que soy hoy en día. Hemos vivido una gran cantidad de momentos juntos, los cuales yo atesoraré por siempre.

A mis hermanos Alberto y Marilia por el apoyo brindado y mostrarme que puedo contar con ellos incluso en los momentos más terribles. La vida me enseñó que podemos ser el mejor grupo y que en todo momento estaremos dispuestos a apoyarnos entre nosotros.

Del mismo modo quisiera agradecerle a mi sobrino Flavio porque considero que es un gran pilar en esta familia, simboliza la esperanza en vida. Sin él en estos momentos todo estaría perdido.

Por último y no menos importante, quisiera agradecerle a mi novia Desyree, porque a medida que fuimos conociéndonos y cultivando nuestro amor he podido aprender lo hermoso que puede llegar a significar para uno mismo tener una conexión pura con otro ser humano, lo cual a mi consideración va más allá de todo lo bueno, como el amor incondicional, amistad y lealtad. Gracias por el apoyo total en los momentos más difíciles.

Este trabajo fue subvencionado por el Vicerrectorado de investigación de la UCSM en el marco del concurso “Fondos para la investigación 2019”, según resolución 6903-CU-2019.

EPÍGRAFE



“El talento es el hombre en libertad; nace en cualquier persona que se sienta capaz de volar con sus ideas”

-Luis Alberto Spinetta

RESUMEN

Es importante encontrar una gestión adecuada de las aguas residuales, con el propósito de evitar toda contaminación en el medio ambiente. Teniendo en consideración la posible contaminación producida por el lactosuero, el cual es parte de los principales efluentes de la industria láctea, se ha optado por desarrollar métodos que permitan mitigar su impacto ambiental negativo. Es debido a eso que en el presente trabajo se empleó un biocoagulante elaborado a partir de quitosano y mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*), realizando así un pretratamiento al lactosuero con un proceso de coagulación y floculación.

El mucílago de nopal se logró extraer por un método de precipitación con etanol al 95%, obteniendo un rendimiento de 0.69%. Seguido de ello, se sintetizó quitosano a partir de quitina comercial por medio de un proceso de desacetilación alcalina, logrando obtener un rendimiento de 56.22%.

Posterior a la extracción y síntesis, ambos biocoagulantes se caracterizaron por FTIR, logrando obtener, con respecto al mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) bandas características que evidenciaban la presencia de grupos carboxilo, hidroxilo y carbonilo. Por parte del quitosano, se pudo identificar a bandas características con la presencia de grupos amino primarios y grupos hidroxilo, además de obtener un grado de desacetilación de 80.93% mediante el cálculo empleado que dispone de las bandas a 1320cm^{-1} y 1420cm^{-1} .

Luego de obtener ambos coagulantes, se procedió a elaborar unas biopelículas las cuales estaban formuladas de manera distinta: 75%Quitosano-25%Mucílago (relación Q/M; 0.75), 50%Quitosano-50%Mucílago (relación Q/M; 0.5) y 25%Quitosano-75%Mucílago (relación Q/M; 0.25). Posterior a la elaboración de las biopelículas se realizó el proceso de coagulación y floculación empleando efluente lácteo previamente preparado, pudiendo obtener una remoción máxima de 97.17% de turbidez con los parámetros de relación Q/M de 0.75, pH 6 y 75°C . Con respecto al DQO, se analizó únicamente en el ensayo óptimo en cuanto a turbidez, el cual proporcionó una remoción del 26% de DQO.

Con respecto al análisis estadístico del efecto de la dosis de biocoagulante compuesto por mucílago de nopal y quitosano sobre la turbidez, los resultados proporcionados al emplear el diseño experimental de Taguchi indicaron aceptar la hipótesis nula, debido a que el biocoagulante compuesto mucílago de nopal y quitosano no evidenció un efecto significativo en el porcentaje de

remoción de turbidez obtenido al tratar el efluente lácteo. Se encontró que la variable de pH fue la única que presentó un efecto estadísticamente significativo, siendo su valor P de 0.009 en ANOVA para relaciones S/R vs factores. Finalmente, se realizaron pruebas confirmatorias como parte de la última etapa del método de Taguchi, generando resultados altamente eficientes (mínimo 87.10% de remoción de turbidez) y algunos cercanos al resultado óptimo, como en el caso del ensayo que empleó los niveles óptimos predichos (relación Q/M 0.75, 50°C y pH 6), el cual removió 95.98% de turbidez.

Palabras clave: *Biocoagulación, efluente lácteo, biocoagulantes.*



ABSTRACT

Proper wastewater management is crucial to preventing environmental pollution. Considering the potential contamination caused by whey, one of the main effluents of the dairy industry, methods have been developed to mitigate its negative environmental impact. For this reason, in the present study, a bio-coagulant made from chitosan and mucilage from prickly pear cactus (*Opuntia ficus indica*) was used to pretreat whey through a coagulation and flocculation process.

The mucilage was extracted using a precipitation method with 95% ethanol, yielding 0.69%. Subsequently, chitosan was synthesized from commercial chitin through an alkaline deacetylation process, achieving a yield of 56.22%.

After extraction and synthesis, both bio-coagulants were characterized by FTIR. For *Opuntia ficus indica* mucilage, characteristic bands evidenced the presence of carboxyl, hydroxyl, and carbonyl groups. As for chitosan, characteristic bands confirmed the presence of primary amino groups and hydroxyl groups, with a degree of deacetylation of 80.93%, calculated using the bands at 1320 cm^{-1} and 1420 cm^{-1} .

Once both coagulants were obtained, biopolymer films were formulated with different compositions: 75% Chitosan – 25% Mucilage (Q/M ratio: 0.75), 50% Chitosan – 50% Mucilage (Q/M ratio: 0.5), and 25% Chitosan – 75% Mucilage (Q/M ratio: 0.25). Following the formulation of these films, a coagulation and flocculation process was carried out using a prepared dairy effluent. A maximum turbidity removal of 97.17% was achieved under the parameters of a Q/M ratio of 0.75, pH 6, and 75°C . Regarding COD, it was analyzed only for the optimal turbidity removal test, resulting in a 26% reduction in COD.

Regarding the statistical analysis of the effect of the bio-coagulant dose (composed of *Opuntia ficus indica* mucilage and chitosan) on turbidity, the results obtained using the Taguchi experimental design led to the acceptance of the null hypothesis, as the bio-coagulant did not show a significant effect on the percentage of turbidity removal in the treated dairy effluent. It was found that pH was the only statistically significant variable, with a P-value of 0.009 in the ANOVA for S/N ratios vs. factors. Finally, confirmatory tests were carried out as part of the final stage of the Taguchi method, yielding highly efficient results (a minimum of 87.10% turbidity removal),

including values close to the optimal result—such as the trial that used the predicted optimal levels (Q/M ratio of 0.75, 50°C, and pH 6), which achieved a turbidity removal of 95.98%.

Key words: *biocoagulation, dairy effluent, biocoagulants.*



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN..... 1

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN..... 3

JUSTIFICACIÓN..... 5

OBJETIVOS..... 7

OBJETIVO GENERAL..... 7

OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 7

HIPÓTESIS..... 8

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO..... 9

1.1.Efluentes industriales..... 9

1.1.1. Tratamiento de efluentes industriales..... 11

1.1.1.1. Etapas del tratamiento de efluentes industriales..... 11

1.1.2. Parámetros de la calidad del agua..... 12

1.2.Industria láctea..... 13

1.2.1. Lactosuero..... 15

1.2.1.1. Clasificación del lactosuero..... 16

1.2.1.2. Composición del lactosuero..... 16

1.3.Diseño experimental de Taguchi..... 18

1.4.Coagulación.....	19
1.4.1. Factores que influyen en el proceso de coagulación.....	20
1.4.2. Tipos de coagulación empleados para tratamiento de efluentes industriales.....	20
1.4.2.1. Coagulación química.....	20
1.4.2.2. Electrocoagulación.....	23
1.4.2.3. Biocoagulación.....	23
1.5.Biocoagulante.....	24
1.5.1. Categorías de biocoagulantes.....	25
1.6.Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	26
1.6.1. Mucílago de nopal	27
1.7.Quitosano.....	29
1.7.1. Caracterización del quitosano.....	30
1.8.Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).....	31
1.8.1. Grupos funcionales y sus absorciones IR características.....	33
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
2.1.Lugar de ejecución.....	35
2.2.Materiales.....	35
2.2.1. Material biológico.....	35
2.2.2. Insumos.....	35
2.2.3. Material de vidrio.....	35
2.2.4. Equipos.....	36
2.3.Métodos.....	37

2.3.1. Extracción de mucílago a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) por precipitación con etanol al 95%; y síntesis de quitosano a partir de quitina comercial por desacetilación alcalina.....	37
2.3.1.1. Extracción de mucílago a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) por precipitación con etanol al 95%.....	37
2.3.1.2. Síntesis de quitosano a partir de quitina comercial por desacetilación alcalina.....	37
2.3.2. Caracterización de la obtención de mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) y quitosano.....	40
2.3.2.1. Caracterización de mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).....	40
2.3.2.2. Caracterización del quitosano por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier.....	41
2.3.3. Interpretar los biocoagulante elaborados a partir de mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) y quitosano.....	42
2.3.3.1. Preparación de biocoagulante compuesto por mucílago extraído de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) y quitosano.....	42
2.3.4. Evaluación de la eficiencia del biocoagulante compuesto por mucilago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) y quitosano a diferentes proporciones como pretratamiento alternativo de un efluente lácteo.....	43
2.3.4.1. Obtención de la muestra.....	43
2.3.4.2. Caracterización inicial de la muestra de lactosuero.....	43
2.3.4.3. Preparación de la muestra.....	44

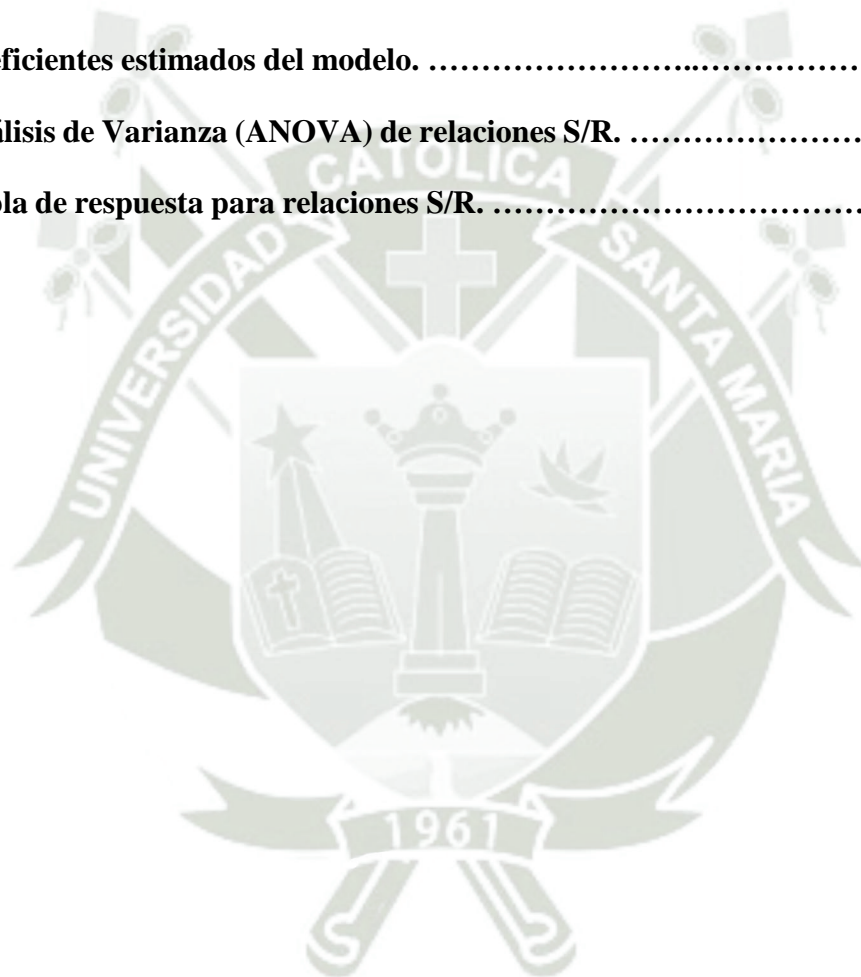
2.3.4.4. Estrategias experimentales.....	44
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
3.1.Extracción de mucílago a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) por precipitación con etanol al 95%; y síntesis de quitosano a partir de quitina comercial por desacetilación alcalina.....	48
3.1.1. Extracción de mucílago a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) por precipitación con etanol al 95%.....	48
3.1.1.1. Rendimiento obtenido.....	48
3.1.2. Síntesis de quitosano a partir de quitina comercial por desacetilación alcalina.....	50
3.1.2.1. Valoración de la solución de NaOH al 70%.....	50
3.1.2.2. Rendimiento obtenido.....	51
3.2.Caracterización de la obtención de mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) y quitosano.....	54
3.2.1. Caracterización de mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).....	54
3.2.2. Caracterización de quitosano por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)	56
3.2.2.1. Determinación de grados de desacetilación.....	58
3.3.Interpretar los biocoagulantes elaborados a partir de mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) y quitosano.....	66
3.4.Evaluación de la eficiencia del biocoagulante compuesto por mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) y quitosano a diferentes proporciones como pretratamiento	

alternativo de un efluente lácteo.....	75
3.4.1. Caracterización inicial del lactosuero.....	75
3.4.2. Ensayo sobre el efecto del biocoagulante compuesto a diferentes proporciones de mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) y quitosano en muestra de lactosuero.....	75
3.4.2.1. Segunda caracterización de lactosuero.....	75
3.4.2.2. Estrategias experimentales.....	77
3.4.2.3. Determinación de DQO al resultado óptimo del diseño experimental de Taguchi.....	83
3.4.2.4. Tratamiento estadístico.....	85
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
ANEXOS.....	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de aguas residuales industriales.	9
Tabla 2. Valores promedios de vertidos acuosos en la industria láctea.	15
Tabla 3. Composición general del lactosuero.	17
Tabla 4. Composición mineral de lactosuero ácido y dulce.	17
Tabla 5. Contenido vitamínico del lactosuero.	18
Tabla 6. Coagulantes químicos inorgánicos más usados.	22
Tabla 7. Coagulantes químicos orgánicos más usados.	23
Tabla 8. Composición promedio por cada 100 gramos de cladodio de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).	26
Tabla 9. Grupos funcionales y sus absorciones IR características.	33
Tabla 10. Diseño experimental a realizar (Taguchi).	46
Tabla 11. Rendimiento obtenido luego de la síntesis de quitosano.	52
Tabla 12. Rendimientos obtenidos en la literatura empleando condiciones distintas.	53
Tabla 13. Grados de desacetilación presentes en el quitosano sintetizado.	59
Tabla 14. Parámetros comparativos en la literatura que proporcionan grados de desacetilación variados.	62
Tabla 15. Biocoagulantes reportados en la literatura para tratar aguas residuales.	70
Tabla 16. Empleo de mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i> y quitosano en tratamiento de efluentes lácteos.	72
Tabla 17. Mezcla de coagulantes empleadas para tratar efluentes.	73
Tabla 18. Promedios de turbidez y de los porcentajes de remoción obtenidos en los ensayos realizados por triplicado.	78

Tabla 19. Resultados de combinaciones sugeridas por la gráfica de efectos principales.....	88
Tabla 20. Resultados del diseño experimental empleado después del proceso de tratamiento.	139
Tabla 21. Promedio de los porcentajes de turbidez, desviación estándar, relación S/R y coeficiente de variación.	140
Tabla 22. Coeficientes estimados del modelo.	140
Tabla 23. Análisis de Varianza (ANOVA) de relaciones S/R.	141
Tabla 24. Tabla de respuesta para relaciones S/R.	141



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la doble capa eléctrica.	10
Figura 2. Pasos a realizar para la ejecución del método de Taguchi.	19
Figura 3. Estructura molecular de L-arabinosa.	28
Figura 4. Estructura molecular de ácido D-galacturónico.	28
Figura 5. Estructura molecular de D-galactosa.	28
Figura 6. Estructura molecular de L-ramnosa.	29
Figura 7. Estructura molecular de D-xilosa.	29
Figura 8. Quitina y su denominación posterior al proceso de desacetilación, en base a los grupos acetilo presentes.	31
Figura 9. Camino óptico de la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier.....	32
Figura 10. Polvo fino de coagulante de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).	48
Figura 11. Gasto obtenido en el proceso de titulación ácido-base.	50
Figura 12. Punto final alcanzado en el proceso de titulación ácido-base.	50
Figura 13. Quitosano seco.	51
Figura 14. Espectro IR del mucílago extraído de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).	55
Figura 15. Espectro IR del quitosano purificado.	57
Figura 16. Bandas amida II y -CH₂.	59
Figura 17. Mecanismo de reacción del proceso de desacetilación de la quitina.	61
Figura 18. Biopelículas elaboradas con mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) y quitosano. A la izquierda 50% Quitosano-50%Mucílago (Q/M 0.5); al centro 75% Quitosano-25%Mucílago (Q/M 0.75); a la derecha 25% Quitosano-75%Mucílago	

(Q/M 0.25).	67
Figura 19. Resultado obtenido de DQO del lactosuero diluido x10 (140 NTU).	76
Figura 20. Gráfico de barras: remoción de turbidez obtenida en cada ensayo.	79
Figura 21. Comparativa entre efluente sin tratar y el resultado óptimo (ensayo N°9).....	80
Figura 22. Resultado de DQO obtenido del ensayo óptimo en cuanto a turbidez.	84
Figura 23. Nopal cortado dejado en maceración por 24 horas.	122
Figura 24. Proceso de filtrado del extracto de nopal.	122
Figura 25. Extracto de nopal post-filtrado.	123
Figura 26. Extracto de nopal sumergido en etanol al 95%.	123
Figura 27. Solución preparada de NaOH al 70%.	124
Figura 28. Titulación de HCl 1M con NaOH 1M.	124
Figura 29. Quitina de la marca Sigma-Aldrich.	125
Figura 30. Pesado de la quitina comercial.	125
Figura 31. Sistema de condensación de reflujo.	126
Figura 32. Proceso de desacetilación, configurado a 115°C y 500 RPM.	126
Figura 33. Ajuste a pH 7 con lavados de agua destilada.	127
Figura 34. Quitosano disuelto en solución de ácido acético al 3%.	127
Figura 35. Regeneración de quitosano con NaOH 1M.	128
Figura 36. Lavado de quitosano con agua destilada.	128
Figura 37. Diálisis de quitosano por 72 horas a 5°C.	129
Figura 38. Espectrómetro Nicolet™ Summit™.	129
Figura 39. Pastilla elaborada para el FTIR del mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	130

Figura 40. Interfaz del software OMINC Paradigm empleado para el FTIR del mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).	130
Figura 41. Pastilla elaborada para el FTIR del quitosano.	131
Figura 42. Interfaz del software OMNIC Paradigm empleado para el FTIR del quitosano.....	131
Figura 43. Proceso de elaboración de las biopelículas conformadas por quitosano y mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).	132
Figura 44. Lactosuero luego de las 24 horas a 4°C.	132
Figura 45. Proceso de desgrasado empleando la bomba a vacío.	133
Figura 46. Lactosuero desgrasado.	133
Figura 47. Dilución x10 del lactosuero.	134
Figura 48. Pesado de 0.01g de biocoagulante.	134
Figura 49. Digestión de vial de DQO.	135
Figura 50. Primer triplicado luego de sedimentar 24 horas a 4°C.	136
Figura 51. Segundo triplicado luego de sedimentar 24 horas a 4°C.	136
Figura 52. Tercer triplicado luego de sedimentar 24 horas a 4°C.	136
Figura 53. Séptimo triplicado después de sedimentar 24 horas a 4°C.	137
Figura 54. Octavo triplicado después de sedimentar 24 horas a 4°C.	137
Figura 55. Noveno triplicado después de sedimentar 24 horas a 4°C.	137
Figura 56. Noveno triplicado evidenciando la formación de grandes flóculos.	138
Figura 57. Sedimentación completa a los 5 minutos en el noveno triplicado.	138
Figura 58. Gráfica de efectos principales para relaciones S/R.	142

INTRODUCCIÓN

Actualmente es de conocimiento público que diversas industrias, como el de las curtiembres, mineras, petroleras, químicas, textil, alimentaria, entre otros, generan contaminación al no tener la correcta gestión de los efluentes generados, compuestos por una variedad de contaminantes que generalmente se categorizan entre contaminantes orgánicos e inorgánicos. En ese contexto, la industria láctea no es ajena a la producción de efluentes residuales, estos efluentes residuales se caracterizan principalmente por su alto contenido de materia orgánica. Los efluentes generados por la industria láctea provienen de diversos procesos, involucrando actividades como el transporte de leche, lavados, recepción y procesamiento industrial de la materia prima, entre otros, los cuales no necesariamente reciben un apropiado tratamiento, además de ser desechados al medio ambiente y ocasionando un gran impacto ambiental negativo ¹⁻³. El lactosuero es uno de los efluentes que mayor contaminación genera en esta industria, debido a que el volumen generado es muy excesivo principalmente en la elaboración de quesos, siendo aproximadamente el 80-90% del contenido total de la leche ⁴.

Se han desarrollado métodos para ser empleados en el tratamiento de aguas residuales, los cuales se categorizan como físicos, químicos y biológicos, procesos empleados de manera independiente o combinándose entre sí para formar parte de las etapas de remediación, las cuales constan del pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario ⁵⁻⁷. Los métodos basados en coagulación se emplean como parte del tratamiento, los cuales consisten en desestabilizar las partículas coloidales, además de los sólidos suspendidos ⁸; los métodos empleados se dividen en coagulación química (empleo de agentes químicos coagulantes de naturaleza orgánica e inorgánica), electrocoagulación (empleo de placas metálicas paralelas e inducción de corriente eléctrica) y biocoagulación, siendo este último de mucho interés en estos últimos años por ser un método amigable con el medio ambiente, empleando materia biológica encontrada en vegetales y otros organismos presentes en la naturaleza, removiendo contaminantes del efluente al interactuar con sus sitios cargados por medio de mecanismos como la adsorción y formación de puentes entre moléculas ⁹⁻¹¹.

Parte de la composición de los biocoagulantes está conformada por los electrolitos (catiónicos, aniónicos y no iónicos) parte de su composición, radicando su importancia en las propiedades que presenta, como biodegradabilidad, volumen reducido de formación de lodos sin potencial

nocivo, requerimiento de una dosis mínima y formación de flóculos grandes, densos y compactos. Hasta ahora se ha reportado el empleo de diversos biocoagulantes en la literatura, como *Moringa oleifera*, *Strychnos potatorum*, *Ocimum tenuiflorum*, *Trigonella foenum-graecum*, *Opuntia ficus indica*, *Aloe vera*, quitosano, alginato de sodio, etc ¹²⁻¹⁵.

Esta tesis tiene como objetivo general evaluar la eficiencia que puede presentar un biocoagulante compuesto por nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano como pretratamiento para la remoción de contaminantes presentes en efluentes lácteos, expresados en parámetro de turbidez.



PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

La industria láctea es parte de los mayores productores de agua residuales a nivel mundial, generando residuos de gran impacto ambiental negativo, con volúmenes que oscilan entre 4-10 litros de efluente por cada litro de leche tratada. De acuerdo a la FAO, a nivel mundial en el año 2021, Asia produjo aproximadamente 420 millones de toneladas de leche; Europa aproximadamente 245 millones de toneladas; Norteamérica alrededor de 110 millones de toneladas; Sudamérica cerca de 70 millones de toneladas; y Centroamérica y el Caribe con una cifra de casi 20 millones de toneladas ^{2,16}. Los efluentes originados por las industrias lácteas presentes en los países mencionados y otros, proceden principalmente de los lavados de camiones que transportan la leche, derrames producidos por fugas, limpieza de instrumentos empleados al hacer la estandarización y tratamientos térmicos, pérdidas al procesar la materia prima, detergentes y productos de limpieza, así como también el suero procedente de la producción de mantequilla (mazada) y de la elaboración del queso ^{2,17}, el cual compone gran parte del volumen de la leche, oscilando entre 80-90% ⁴ y se estima que anualmente se produce entre 180-190 millones de toneladas a nivel mundial ¹⁸. El vertido de estos efluentes, con un alto potencial de contaminación, traen consecuencias negativas principalmente en los recursos hídricos, lo cual incluye la disminución del O₂ disuelto por la alta cantidad de materia orgánica (proteínas, lípidos, lactosa) presente en la composición de ese tipo de efluentes, evidenciándose en los altos valores que presenta de DBO y DQO, volviendo el agua un medio anaeróbico, liberando sustancias tóxicas volátiles, provocando la destrucción de la vida presente en ecosistemas acuáticos, y por ende, un severo daño ambiental ¹⁹.

De acuerdo al Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI) ²⁰, en el año 2020, a nivel nacional se produjo 2 millones 135 mil 881 toneladas de leche, siendo el mayor productor Cajamarca (17.2%), seguido de Lima (17%) y finalmente Arequipa (16.8%), con una cantidad de toneladas de 367 mil 231, 362 mil 240 y 358 mil 535 respectivamente, significando una gran generación de aguas residuales al basarnos que se produce 4-10 litros de efluente por litro de leche procesada; en el caso de Cajamarca se generó aproximadamente 1 millón 468 mil 924 – 3 millones 672 mil 310 toneladas; Lima generó 1 millón 448 mil 960 – 3 millones 622 mil 400 toneladas y; Arequipa produjo 1 millón 434 mil 140 – 3 millones 585 mil 350 toneladas. Además, en cuanto a la

producción de quesos, en el año 2021, de acuerdo al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) ²¹, la producción fue de 126.685 toneladas, generando entre 506 mil 740 y 1 millón 140 mil 165 toneladas de lactosuero como residuo, por su composición del 80-90% de la leche.

Es de suma importancia comprender la naturaleza y el impacto de los residuos generados por la industria láctea, especialmente en la región de Arequipa, considerada una de las principales cuencas lecheras a nivel nacional. De acuerdo con la literatura, en los países en desarrollo, como es el caso del Perú, aproximadamente el 70% de los efluentes industriales son vertidos sin tratamiento previo, situación que se asocia principalmente a la carencia de tecnologías adecuadas para el manejo y tratamiento de aguas residuales, así como a la ausencia de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) *in situ*.

En este contexto, muchas unidades productivas de carácter artesanal o semiindustrial continúan realizando el vertimiento de sus residuos líquidos directamente al sistema de drenaje, lo que finalmente conlleva a la descarga de estos efluentes en cuerpos de agua receptores. Esta práctica deteriora significativamente la calidad del recurso hídrico y genera impactos ambientales adversos sobre los ecosistemas acuáticos, afectando tanto la flora como la fauna asociada a dichos entornos.

JUSTIFICACIÓN

En cuanto a la justificación tecnológica, la biocoagulación permite evaluar la eficiencia que puede presentar la combinación de coagulantes naturales como una alternativa innovadora para el tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria láctea. Este enfoque busca aportar información relevante al desarrollo de tecnologías de bajo impacto ambiental aplicadas a procesos de biorremediación, ofreciendo ventajas frente a métodos convencionales como la coagulación química o la electrocoagulación, principalmente en términos de costos operativos, disponibilidad de materiales, reducción de residuos tóxicos y eficiencia, esto último dependiendo de las condiciones del sistema. La eficiencia alcanzada por los biocoagulantes propuestos no solo resulta significativa para el presente estudio, sino que también puede constituir una base tecnológica para su futura aplicación en el tratamiento de efluentes de otras industrias, promoviendo así el uso de procesos más sostenibles y ambientalmente compatibles.

Con respecto a la justificación ambiental, el presente estudio busca mitigar el impacto ambiental generado por el vertimiento de efluentes sin tratamiento previo, previniendo los efectos negativos que estos pueden causar en cuerpos de aguas superficiales y ecosistemas acuáticos. La aplicación de biocoagulantes contribuye a reducir significativamente la contaminación asociada a la elevada carga orgánica característica de los efluentes provenientes de la industria lechera, la cual suele originarse por prácticas inadecuadas de gestión de residuos líquidos. Asimismo, los coagulantes empleados presentan la ventaja de ser ecoamigables y biodegradables, generando una cantidad considerablemente menor de lodos residuales en comparación con los coagulantes químicos tradicionales, los cuales se asocian con la formación de residuos potencialmente tóxicos. Adicionalmente, el proceso de biocoagulación no requiere un consumo energético elevado, a diferencia de la electrocoagulación, lo que refuerza su carácter sostenible y su contribución a la implementación de tecnologías limpias dentro del tratamiento de aguas residuales

En cuanto a la justificación económica, el uso de biocoagulantes representa una alternativa costo-efectiva frente a métodos convencionales como la coagulación química y la electrocoagulación. Estos materiales pueden obtenerse a partir de fuentes naturales abundantes y renovables, lo que reduce significativamente los costos asociados a su adquisición. Además, el procesamiento de la materia prima para la obtención de biopolímeros, como el mucílago de

nopal (*Opuntia ficus indica*) y el quitosano, es relativamente sencillo y requiere una inversión mínima en infraestructura o reactivos. Otra ventaja económica relevante es que los biocoagulantes suelen emplearse en bajas concentraciones por volumen de agua tratada, manteniendo una alta eficiencia de remoción, lo que favorece su rentabilidad incluso en etapas experimentales o de escala piloto. En contraste, la coagulación química implica el uso de coagulantes industriales de mayor costo y la generación de residuos que demandan tratamientos adicionales, mientras que la electrocoagulación conlleva un alto consumo energético, elevando los costos operativos. Asimismo, el carácter biodegradable y no tóxico de los biocoagulantes reduce la generación de lodos contaminantes y elimina la necesidad de tratamientos secundarios, optimizando tanto la eficiencia económica como ambiental del proceso. En conjunto, estas características consolidan a la biocoagulación como una tecnología económicamente viable y sostenible, adaptable a distintos contextos de tratamiento de aguas residuales.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la eficiencia de un biocoagulante compuesto por mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano como pretratamiento de lactosuero.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Extracción de mucílago a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*) por precipitación con etanol al 95%; y síntesis de quitosano a partir de quitina comercial por desacetilación alcalina.
- Caracterización de la obtención del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano
- Interpretar los biocoagulantes elaborados a partir de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano.
- Evaluar la eficiencia del biocoagulante compuesto por mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano a diferentes proporciones como pretratamiento alternativo de un efluente lácteo.

HIPOTESIS

Dado que en la literatura se reporta que el mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y el quitosano independientemente tienen la propiedad de remover agentes contaminantes de los efluentes residuales, es posible que un biocoagulante compuesto por ambas especies orgánicas adquiera la capacidad de reducir la turbidez como indicador de contaminación en un efluente lácteo.

De rechazar la hipótesis inicial, se aceptaría la siguiente hipótesis nula:

H₀: El biocoagulante compuesto por mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano no tiene un efecto significativo sobre la turbidez.



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Efluentes industriales

Los efluentes industriales son descargas que provienen de distintas industrias ²², como resultado de los procesos industriales y prácticas de eliminación, que pueden terminar afectando la calidad del agua receptora y ecosistema acuático ²³.

La calidad y volumen del agua residual va a depender de la industria de procedencia, sobre todo si el país es desarrollado o está en desarrollo, pudiendo ser considerablemente diferente. El efluente puede contener tanto materia orgánica e inorgánica, entre metales pesados, pesticidas, detergentes, hidrocarburos, compuestos fenólicos, sólidos suspendidos, aceites y grasas, plastificantes, fertilizantes, contaminantes biológicos, etc. Estos contaminantes provienen de diversas industrias, como curtiembres, textil, papel, minera, alimentos, petroquímica, química, síntesis orgánica, entre otras ^{24,25}.

Tabla 1. Tipos de aguas residuales industriales.

Tipo de industria	Características
Industria de alimentos (procesamiento de frutas, vegetales, leche, bebidas)	Alta contaminación orgánica por lo general, fácilmente biodegradable. Incluye también la presencia de sólidos en suspensión
Refinería petroquímica	Gran contenido de sales disueltas, valores altos de DBO y sólidos suspendidos. Puede presentar también compuestos sulfhídricos y emulsiones
Industrias farmacéuticas o de síntesis orgánica	Alta contaminación orgánica, no biodegradable.
Industria siderúrgica, industria galvánica, industria extractiva	Baja contaminación orgánica, alto contenido de sólidos suspendidos.
Industria química	Contaminación orgánica e inorgánica, alta salinidad.
Industria de la pulpa y el papel.	Presenta un pH variable, además de un alto contenido de sólidos suspendidos y color.

Nota: Tomado de Pietro García et al. ², Thomas y Thomas ²⁴.

Los coloides o partículas coloidales se definen como material en suspensión, con un tamaño de $1\mu\text{m}$ - 1000nm . Pueden ser materiales inorgánicos, minerales, biocoloides, compuestos orgánicos, productos de degradación, materia orgánica ²⁶.

La presencia de este sistema coloidal termodinámicamente estable en el agua residual imposibilita la remediación por métodos físicos de separación como procesos de filtración u ósmosis inversa. La gran mayoría de los coloides posee carga negativa, debido a que proceden de la disociación iónica de grupos hidrofílicos (sulfónicos, carboxilos, aminos e hidroxilo), además de que las partículas coloidales adquieren carga negativa, debido a la adsorción de aniones del medio de dispersión ²⁷. Estos sistemas coloidales generalmente contienen dos fases separadas: una fase dispersa y una continua. La fase dispersa (parte que se dispersa) se encuentra suspendida en la fase continua ²⁸.

Alrededor de estas partículas coloidales se forma una doble capa eléctrica, en consecuencia, de la tendencia natural de equilibrio eléctrico, la cual influye bastante en el mecanismo de estabilización electrostática de las partículas coloidales. La doble capa eléctrica es la que rodea una partícula de fase dispersa, incluyendo a los iones adsorbidos en la superficie de la partícula y una película del medio de dispersión contracargado ^{27,29}.

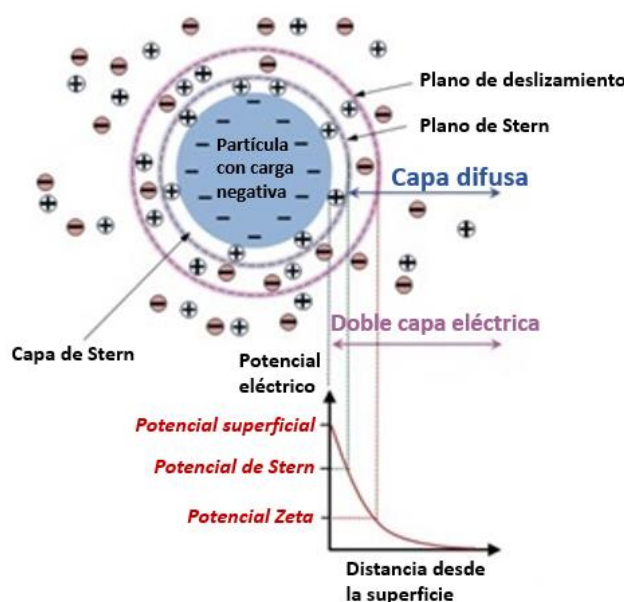


Figura 1. Diagrama de la doble capa eléctrica. Elaborado en base a Park y Seo (2011) ²⁹.

La doble capa eléctrica evita que las partículas se acerquen entre sí, debido al potencial Z generado, además de la presencia de fuerzas superficiales, como por ejemplo, London-van der Waals, hidratación y estéricas, al tratarse de efectos electromagnéticos que se dan a cabo por la atracción-repulsión entre moléculas, las cuales están cargadas eléctricamente ²⁷.

El potencial Zeta, también conocido como potencial electrocinético, es un parámetro electrostático, empleado para la cuantificación de la estabilidad de las cargas de partículas coloidales ³⁰. Está definido como una medida de diferencia de potencial dado entre el fluido por el cual el coloide se dispersa y la capa de fluido que contiene a los contraiones, la cual está asociada a la superficie de la partícula; un valor alto de potencial Zeta (mayor a $\pm 40\text{mV}$) confiere estabilidad al sistema coloidal; un valor pequeño de potencial Z (entre 0 y $\pm 5\text{mV}$) ocasionará que las fuerzas de atracción superen a las fuerzas de repulsión y dispersión, produciendo así una ruptura del sistema coloidal, formando aglomeraciones y una futura floculación ^{31,32}. Los factores a considerar son la fuerza iónica, concentración de aditivos, temperatura y pH, siendo este último el factor de mayor importancia que afecta al potencial Z ³³.

Es importante comprender la naturaleza de los sistemas coloidales para poder tratar efluentes industriales, debido a que, el empleo de los debidos procesos amerita un fundamento.

1.1.1. Tratamiento de efluentes industriales

El tratamiento de efluentes industriales es el medio por el cual se restaura el agua previamente contaminada, a una calidad deseable, antes que llegue a suelos, ríos, lagos y mares. La calidad requerida va de acuerdo a su uso previsto: agua potable, vida acuática, riego, entre otras formas de empleo ³⁴.

1.1.1.1. Etapas del tratamiento de efluentes industriales

Las etapas de tratamiento de efluentes industriales pueden catalogarse en pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario, los cuales involucran actividades específicas. El pretratamiento consiste en eliminar por métodos físico-químicos las partículas sólidas

(flotantes) y materia que se encuentre en suspensión, como operaciones de sedimentación y coagulación. El tratamiento primario opta por procesos químicos, como la oxidación para la destrucción del cianuro y la reducción de cromo hexavalente o Cr(VI), el ajuste del pH y la reducción previa de una carga orgánica elevada. Por otro lado, el tratamiento secundario somete el efluente a un tratamiento de depuración mediante técnicas biológicas, físicas o químicas, con la finalidad de eliminar la contaminación química, mediante procesos de biodegradación, filtración, adsorción, entre otros. Por último, el tratamiento terciario consiste en eliminar los contaminantes residuales y/o las moléculas producidas durante la etapa anterior. Esta última etapa emplea procesos de adsorción con carbón activado, intercambio iónico, diversos tipos de filtración por membrana como ultrafiltración y ósmosis inversa, la oxidación avanzada y humedales construidos, también denominados *wetlands* ³⁵.

1.1.2. Parámetros de la calidad del agua

Los parámetros de calidad del agua son aquellos que nos brindan información sobre el estado actual del recurso hídrico a analizar o de interés, por medio de una caracterización que involucra métodos físicos, químicos y microbiológicos.

a) pH

El pH es el logaritmo recíproco (logaritmo negativo) de la actividad del ión hidrógeno presente en una solución acuosa. Su determinación es de acuerdo a la cantidad de iones libres de hidrógeno presentes en una determinada sustancia ³⁶.

b) Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se define como la capacidad de la corriente eléctrica para fluir a través del agua ³⁷.

c) Sólidos totales

Los sólidos totales son el remanente obtenido de una determinada muestra posterior a un proceso de evaporación y secado en horno, con una cantidad de tiempo y temperatura definidos. Está conformado por los sólidos suspendidos totales (TSS) y sólidos disueltos totales (TDS); los sólidos suspendidos totales consiste en la porción de los sólidos totales presente en una muestra acuosa, la cual se queda retenida en el filtro, mientras que los sólidos disueltos totales son la porción de sólidos totales presente en una muestra, la cual es capaz de pasar a través de un filtro de $2,0\mu\text{m}$ en condiciones específicas ³⁸.

d) Turbidez

La turbidez es la reducción de la claridad del agua causada por la materia suspendida (orgánica e inorgánica) que absorbe o dispersa la luz hacia abajo ³⁹.

e) Oxígeno disuelto

Es el nivel de oxígeno libre no compuesto (O_2) que se encuentra disuelto en agua ⁴⁰.

f) DQO

Es la cantidad de oxígeno requerida para que la materia orgánica, la cual se encuentra presente en una muestra de agua, pueda ser degradada ⁴¹.

1.2. Industria láctea

La industria láctea es muy importante para la economía, tanto de países industrializados como en desarrollo ⁴². Esta industria tiene como enfoque principal el procesamiento de la leche cruda, la cual puede provenir de mamíferos como vacas, cabras, ovejas, etc., con la finalidad de convertirla en diversos productos: yogurt, queso, mantequilla, etc. ^{43,44}.

Se genera una gran contaminación debido a la generación de residuos líquidos que logra contener lactosuero, leche de mantequilla, leche diluida, e inclusive, detergentes y agentes

sanitizantes, entre otros contaminantes ^{7,42,45}. En sus procesos de producción emplea una cantidad de agua aproximada de 1.3-3.2 litros por kilogramo de leche recibida, generando de 6 a 10 litros de efluentes por litro de esta (1034 kilogramos, de acuerdo a su densidad). Estos efluentes se caracterizan por presentar valores altos de DBO y DQO, además de contener sólidos suspendidos, sólidos disueltos, grasas, nutrientes y agentes desinfectantes. El 90-95% de DBO que está presente en efluentes de la industria láctea se debe a la pérdida de materia prima o derivados en el proceso de su elaboración; en cuanto al DQO, se debe al empleo de productos químicos de limpieza ^{11,46}. La presencia de materia orgánica convierte las aguas residuales en medios con sustrato ideal para la fermentación de bacterias ⁴⁷.

En la industria láctea, los procesos que comúnmente generan efluentes son: la recepción de la leche, donde los residuos generados resultan de la limpieza de cisternas, con alta cantidad de grasa debido al desnatado parcial que puede ocurrir al transportar la materia prima; estandarización de la leche, el cual implica estandarizar la leche en materia grasa, generando efluentes con cantidades altas de materia grasa; tratamientos térmicos, los cuales generan efluentes conteniendo proteínas y agentes sanitizantes, debido a que este último se emplea para limpiar la materia orgánica que queda depositada en los intercambiadores de calor; producción de queso, el cual genera como subproducto lactosuero con gran cantidad de salinidad procedente del proceso de salado; producción de mantequilla, el cual proporciona el suero de mantequilla o mazada; y transporte de productos lácteos líquidos, de donde proviene la mayor parte de aguas residuales de esta industria debido a la limpieza de los circuitos y equipos, generando residuos a partir de la sosa y ácido clorhídrico empleados, proporcionando un pH extremo ².

Tabla 2. Valores promedios de vertidos acuosos en la industria láctea.

Parámetro/Constituyente	Unidad	Rango de concentración
DBO	mg /L	300-4800
DQO	mg O ₂ /L	650-7200
Sólidos en suspensión	mg/L	24-5700
Sólidos totales	mg/L	135-8500
pH	-	4-12
Nitrógeno total	mg/L	30-180
Nitrógeno orgánico	mg/L	10-140
Amonio	mg/L	10-20
Nitrato	mg/L	10-20
Cloruro	mg/L	50-500
Fósforo	mg/L	10-132
Alcalinidad	mg/L	257-657
Grasas	mg/L	35-500
Proteínas	mg/L	210-560
Carbohidratos	mg/L	252-930

Nota: Tomado de Prieto García et al.², Bolognesi et al.⁴⁴.

1.2.1. Lactosuero

El lactosuero es un subproducto que más abunda de la industria láctea, procedente principalmente al elaborar queso, componiendo el 85-95% de volumen de la leche. El color que presente va a depender de ciertas cualidades de la leche, como la calidad y tipo, pues, a pesar de presentar por lo general un color amarillo-verdoso traslúcido, pueden presentarse un color azulado^{48,49}.

1.2.1.1. Clasificación del lactosuero

El lactosuero puede clasificarse principalmente en dos tipos, los cuales son lactosuero dulce y ácido. El lactosuero ácido procede de la coagulación ácida o láctica de la caseína. Presenta un pH aproximado a 4.5, debido a que la lactosa se ha transformado en ácido láctico; debido a que posee el 80% de los minerales presentes en la leche inicial, se le considera un suero mineralizado contiene el 80% de minerales de la leche inicial. Los grados Dormic son menores 20°. Por otro lado, el lactosuero dulce proviene de la coagulación enzimática, empleada para precipitar proteínas por hidrólisis específica de la k-caseína. Presenta bajas cantidades de ácido láctico y minerales, sobre todo calcio y fósforo, en comparación con el suero ácido. El pH es mayor a 6, cercano al de la leche inicial y presenta grados Dormic mayor a 50°^{49,50}.

1.2.1.2. Composición del lactosuero

Las proporciones pueden variar, de acuerdo al tipo de lactosuero. El lactosuero dulce presenta 4.6-6.5% de lactosa, 0.6-1.2% de proteína, 0.3-0.5% de grasa y una cantidad mínima de ácido láctico, cuyo máximo valor es de 0.2%. Por otro lado, el lactosuero ácido presenta 3.8-4.5% de lactosa, 0.6-0.8% de proteína, 0.3-0.4% de grasa y 0.64% de ácido láctico. La fracción de minerales es variable, dependiendo del tipo de suero, notándose sobre todo al comparar las partes por millón de calcio y fósforo entre suero dulce y ácido. Las proteínas solubles presentes en el lactosuero son aproximadamente el 25% de proteínas totales de la leche de partida. Gran parte de las proteínas totales se debe a la presencia de β -lactoglobulina (40-50%) y α -lactoalbúmina (12-15%); la fracción proteica restante corresponde a proteasa peptona (12%), inmunoglobulinas (8%), albúmina de suero bovino (5%), lactoferrina (1%), lactoperoxidasa (0.5%) y glicomacropéptido (12%, solo en lactosuero dulce); la lactosa presente en el lactosuero corresponde al 70-96% que le pertenece a la leche de partida; la fracción lipídica presente en el lactosuero es entre 0.5-8% de la leche de partida; además, el lactosuero también presenta nutrientes como vitaminas del grupo B y ácido ascórbico⁵¹⁻⁵⁴.

Dentro de los principales minerales que se encuentran en el lactosuero están el calcio, sodio, potasio, magnesio y fósforo⁵⁵. Puede haber trazas de otros minerales como cobre, zinc,

manganeso y hierro, los cuales varían dependiendo de la procedencia de la leche y el tipo de lactosuero ⁵⁶.

Tabla 3. Composición general del lactosuero.

Constituyente	Lactosuero ácido	Lactosuero dulce
Sólidos (%)	6.0	6.6
Lactosa (%)	3.8-4.5	4.6-6.5
Proteína (%)	0.6-0.8	0.6-1.2
Grasa (%)	0.3-0.4	0.3-0.5
Ácido Láctico (%)	0.64	0.2
Ceniza (%)	0.72	0.59
Cloruros (ppm)	970	910

Nota: Tomado de Mazorra-Manzano et al. ⁵², Durham y Hourigan ⁵⁷.

Tabla 4. Composición mineral de lactosuero ácido y dulce.

Tipo de lactosuero	Minerales (mg/100g)				
	Ca	Mg	Na	K	P
Ácido	92.8	9	39.8	153	58
Dulce	36.5	6.5	45.5	123	43

Nota: Tomado de Wong et al. ⁵⁵.

Tabla 5. Contenido vitamínico del lactosuero.

Vitaminas	Concentración (mg/mL)
Tiamina	0.38
Riboflavina	1.2
Ácido nicotínico	0.85
Ácido pantoténico	3.4
Piridoxina	0.42
Cobalamina	0.03
Ácido ascórbico	2.2

Nota: Tomado de Parras Huertas ⁵⁴.

1.3. Diseño experimental de Taguchi

Está definido como un modelo estadístico, el cual posee las ventajas de la rentabilidad, ahorro de tiempo, robustez y la sencillez en cuanto a la explicación de los resultados proporcionados; es capaz de optimizar la calidad del producto, tiempo de experimentación y rendimiento del proceso en diversas áreas, como en este caso de interés, evaluación de procesos relacionados a la biorremediación en aguas residuales. Es aplicado para la optimización de parámetros de proceso, permitiendo conocer cómo la media y la desviación estándar del rendimiento de un proceso son afectadas por la influencia de diferentes parámetros ^{58,59,60}.

Se le considera como una de las mejores metodologías experimentales empleadas para determinar el mínimo número de experimentos que se puedan realizar, esto debido a que emplea matrices ortogonales (serie de experimentos en distintas situaciones) para la evaluación de la interacción dada entre todas las combinaciones posibles de los parámetros, tomando en cuenta el límite permisible de estos y sus respectivos niveles considerados en la experimentación ^{61,62}. La relación S/R es la medida estadística de rendimiento que emplea este método, la cual toma en consideración tanto a la media como a la desviación estándar para el análisis de su diseño

experimental; básicamente está definida como la relación S/R que se da entre la media (señal) y la desviación estándar (ruido) y se emplea para analizar y predecir el resultado óptimo. Por lo general, emplea de manera estándar las siguientes relaciones S/R: nominal es mejor (NB), menor es mejor (LB) y mayor es mejor (HB) ^{60,63}.

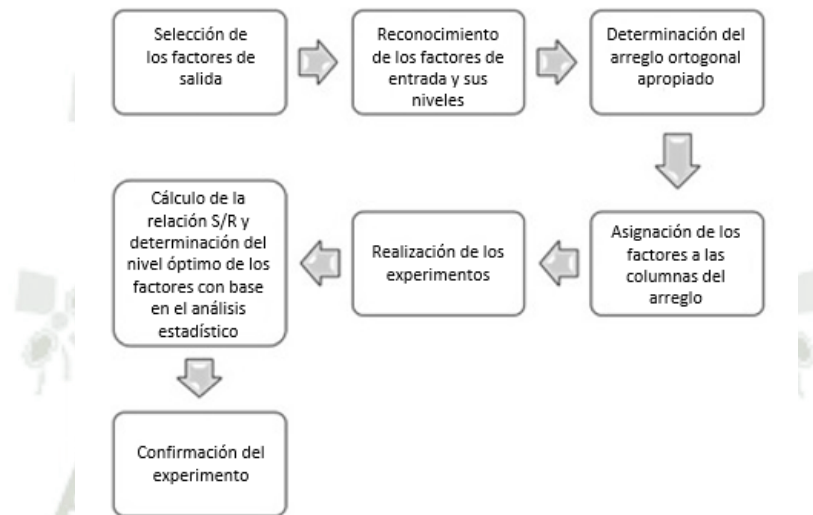


Figura 2. Pasos a realizar para la ejecución del método de Taguchi. Elaborado en base a Malekjani et al. (2024) ⁵⁹.

1.4.Coagulación

Es un fenómeno que promueve la agregación de las partículas coloidales y sólidos en suspensión al desestabilizarlos mediante la neutralización de sus cargas que se da por colisión mutua contra los contraiones, provocando una aglomeración (floculación) y seguido de eso, una sedimentación. Estas partículas suspendidas son las responsables de la turbidez y color que pueda presentar un efluente, además de eliminar el sabor y olor. Son 4 los mecanismos principales por los cuales se produce la agregación de partículas mediante la coagulación, los cuales son la compresión de doble capa, floculación de barrido, puente entre partículas y neutralización de carga ⁶⁴⁻⁶⁷.

Existen factores que afectan la coagulación, así como también hay tipos de coagulación, como la química, electroquímica y natural (biocoagulación).

1.4.1. Factores que influyen generalmente en el proceso de coagulación

El peso molecular afecta el puente entre partículas, de modo que el aumento en el peso molecular llega a mejorar la aglomeración y formación de futuros flóculos. La densidad de carga, la cual se expresa como un porcentaje de grupos iónicos (cargados con o sin la influencia del pH) en relación con los propiciados por el agente coagulante, también influye en la eficiencia final del tratamiento. Por otro lado, la fuerza iónica influye en la alineación del polielectrolito en solución. El tipo de coagulante también es un factor a considerar y su elección va a depender de la química del agua, hidrodinámica y condiciones operativas del sistema de procesamiento ⁶⁶. La temperatura sirve como fuerza impulsora para que se dé una determinada reacción química. Una temperatura alta es capaz de acelerar la velocidad a la cual se da una determinada reacción química; por otro lado, una temperatura baja permite estabilizar la superficie de las partículas coloidales al reducir las reacciones hidrólisis. Se debe tener en cuenta, con la finalidad de no afectar el libre movimiento de las partículas, solubilidad y cinética de reacción del agente coagulante adicionado. Puede también mejorar la solubilidad y actividad del polímero. El pH puede afectar la solubilidad de los agentes coagulantes, debido a que tanto la carga superficial de las partículas coloidales y coagulantes varía a diferentes niveles de pH, lo que termina afectando la neutralización de cargas. También puede afectar la estabilidad de la suspensión ⁶⁸. Por último, es importante considerar la dosis de coagulante, con la finalidad de obtener el rendimiento óptimo del tratamiento, además minimizar el coste de dosificación y la formación de lodos. La sobredosificación y la dosificación insuficiente influirían negativamente en el desempeño de la coagulación ⁶⁹.

1.4.2. Tipos de coagulación empleados para tratamiento de efluentes industriales

1.4.2.1. Coagulación química

La coagulación química implica la adición de agentes coagulantes, tanto orgánicos como inorgánicos, los cuales inducirán la precipitación de las partículas en suspensión al neutralizarlas ⁶⁶.

Es el tipo de coagulación más conocido y empleado para la remoción de contaminantes que puedan estar presentes en las aguas residuales, sin embargo, existen desventajas en el uso de

este método, como los altos costos de los coagulantes químicos empleados, generación de grandes volúmenes de lodos (con potencial ecotoxicológico) y residuos ricos en hidróxidos metálicos no biodegradables ^{70,71}.

a) Coagulación química con coagulantes inorgánicos

La coagulación inorgánica emplea principalmente agentes coagulantes los cuales propician iones Fe^{3+} y Al^{3+} . Se emplea por lo general sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, sulfato ferroso, cloruro férrico, entre otros ⁷².



Tabla 6. Coagulantes químicos inorgánicos más usados.

Nombre	Ventajas	Desventajas
Sulfato de aluminio (alumbre)	Fácil de manejar y aplicar; más comúnmente utilizado; produce menor cantidad de lodo a comparación de la cal; más efectivo entre pH 6.5 y 7.5.	Agrega sólidos disueltos (sales) al agua; eficaz en un rango de pH limitado.
Aluminato de sodio	Eficaz en aguas duras; generalmente se necesita una pequeña dosis.	A menudo se usa con alumbre; alto costo; ineficaz en aguas blandas.
Cloruro de polialuminio	En algunas aplicaciones el flóculo formado es más denso y de sedimentación más rápida, a comparación del alumbre.	No se usa comúnmente; pocos datos a gran escala en comparación con otros derivados del aluminio.
Sulfato férrico	Efectivo entre pH 4-6 y 8.8-9.2.	Agrega sólidos disueltos (sales) al agua; por lo general, es necesario agregar alcalinidad.
Cloruro férrico	Efectivo entre pH 4 y 11.	Agrega sólidos disueltos (sales) al agua; consume el doble de alcalinidad que el alumbre.
Sulfato ferroso	No tan sensible al pH como la cal.	Agrega sólidos disueltos (sales) al agua; generalmente necesita agregar alcalinidad.
Cal	Comúnmente utilizado; muy efectivo; no puede agregar sales al efluente.	Dependiente del pH; produce grandes cantidades de lodo; la sobredosis puede resultar en una mala calidad del efluente.

Nota: Tomado de Tetteh et al.⁶⁶.

b) Coagulación química con coagulantes orgánicos

Estos polímeros son de cadena larga, compuestos por unidades monoméricas y subunidades más pequeñas. Puede ser polielectrolitos, los cuales contienen grupos ionizables como grupos sulfónicos, carboxilo o amino. Por otro lado, los polímeros sin grupos ionizables se identifican como no iónicos⁷³.

Tabla 7. Coagulantes químicos orgánicos más usados.

Nombre	Usos
Clorhidrato de polialuminio (ACH)	Se utiliza en lugar de alumbre donde el agua cruda tiene un pH y una alcalinidad bajos. Tiene poco impacto en el pH.
Cloruro de polialuminio (PACl)	Se utiliza en lugar de alumbre donde el agua cruda tiene un pH y una alcalinidad bajos. Tiene mayor impacto en el pH a comparación del clorhidrato de polialuminio o ACH.
Silicosulfato de polialuminio	Forma flóculos fácilmente.
Sulfato poliférrico	Se utiliza principalmente para aguas residuales emulsionadas con aceite.

Nota: Tomado de Tetteh et al. ⁶⁶.

1.4.2.2. Electrocoagulación

Es un proceso que desestabiliza a las partículas coloidales que se encuentren en un medio acuosa, empleando placas metálicas paralelas (ánodo y cátodo), los cuales inducen una corriente eléctrica al estar conectados externamente a una fuente de alimentación ⁷⁴.

Se da una electrólisis en el ánodo de sacrificio, produciendo cationes metálicos (como Fe^{2+} o Al^{3+}), mientras que el cátodo electroliza el agua, produciendo gas H_2 y iones OH^- . Los cationes metálicos y iones OH^- migran y se combinan, formando coagulantes de hidróxido metálico, los cuales logran desestabilizar la carga superficial que presentan los sólidos en suspensión, rompiendo el sistema coloidal. El gas H_2 eleva el lodo resultante a la superficie del agua ^{75,76}.

1.4.2.3. Biocoagulación

La biocoagulación es un proceso que emplea coagulantes naturales para eliminar contaminantes presentes en los efluentes industriales. Estos biocoagulantes pueden ser de origen vegetal, animal y de procedencia microbiana.

a) Mecanismos de coagulación al emplear biocoagulantes

Los principales mecanismos presentes en un proceso de coagulación al emplear biocoagulantes son adsorción, puentes de polímeros y neutralización de carga. Los biocoagulantes proporcionan una superficie libre para poder adsorber partículas coloidales, y, por lo tanto, formar partículas más grandes de fácil sedimentación. Con respecto a los puentes de polímeros, las partículas coloides se llegan a unir a un extremo de la cadena del polímero de cadena larga, mientras que la otra parte libre de la cadena formará un bucle y una cola. Las moléculas continuarán formando una molécula más grande cuando la cola libre se una con otro coloide libre, incrementando de este modo el tamaño de la partícula. Por último, la neutralización de carga se produce con la adición de biocoagulantes con carga positiva (catiónicos), los cuales producen grupos carboxilato e iones H^+ para neutralizar la suspensión, la cual está compuesta normalmente de coloides con carga negativa, logrando un valor de potencial Zeta cercano a cero y flóculos ⁷⁷.

1.5. Biocoagulante

Los biocoagulantes son coagulantes que provienen de fuentes naturales. Con respecto a su naturaleza, son polielectrolitos, pudiendo ser polímeros aniónicos, catiónicos o neutros, dependiendo del biocoagulante del que se trate. Los biocoagulantes deben su capacidad de desestabilización de carga al contenido de polisacáridos, polímeros de proteínas y algunos grupos funcionales, como los grupos $-OH$, $-COOH$ y $-NH_2$, los cuales promueven los mecanismos de coagulación previamente mencionados. Entre las ventajas que presentan los biocoagulantes, se encuentra que son seguros, económicos y ecoamigables, por lo mismo que no aumentan la carga de metales en el proceso de coagulación y generan un bajo volumen de lodos, además de que están completamente a nuestra disposición por encontrarse en la naturaleza. Por otro lado, su biodegradabilidad no impacta negativamente en el empleo de este tipo de proceso, pues, los lodos también resultan ser biodegradables, pudiendo ser aprovechados en tratamientos posteriores de digestión anaeróbica (producción de gases de interés) o para producción de fertilizantes. Aun así, el empleo de biocoagulantes presenta ciertas limitaciones, como el proceso de extracción que requiere de etapas para poder disponer finalmente del producto final, ya sea de naturaleza vegetal (trituration, tamizado, diálisis, lavado, eliminación de lípidos, eliminación de materia insoluble, filtración e intercambio iónico), animal (lavado,

secado, molienda, desmineralización, desproteínización y desacetilación) o microbiana (cultivo, centrifugación, extracción de sustancias exopoliméricas, filtración y liofilización), además de optimizar el proceso de conservación mediante el almacenamiento en polvo. Entre otra de las limitaciones que presenta el empleo de los biocoagulantes está en disponer de recursos que no compitan con otras necesidades (como alimentos básicos), además de buscar la sostenibilidad y así evitar la escasez en su aplicación a largo plazo. También entra en consideración la naturaleza del efluente y el escalado, ya que, hay muchas variables que se deben de tener en consideración, como la turbidez, pH inicial, contenido orgánico total y la condición electrostática de la muestra de agua ^{77,78}.

1.5.1. Categorías de biocoagulantes

a) Biocoagulantes de origen vegetal

Los biocoagulantes de origen vegetal logran tratar efluentes por coagulación mediante mecanismos como puentes poliméricos o neutralización de carga. Se pueden obtener a partir de diversos componentes de las plantas (sobre todo polisacáridos) y una gran variedad de ellas. Se ha reportado el empleo de plantas en la extracción de polímeros como almidón, goma, semillas, taninos, *Moringa oleífera*, *Ocimum basilicum*, *Cicer arietinum L.*, *Azadiracta indica A. Juss.*, *Cactus latifolia L.*, *Opuntia ficus indica*, etc. ^{73,78}

b) Biocoagulantes de origen animal

Por lo general, se extraen de exoesqueletos de mariscos, caparazones de langostas, camarones, insectos, cangrejos, diatomeas y moluscos, y esponjas marinas y de agua dulce. Resalta el quitosano, el cual se puede encontrar en menor cantidad a comparación de la quitina, la cual es materia prima para poder producirlo mediante un proceso de desacetilación; por otro lado, también se ha reportado el empleo de actinobacterias como *Cellulomonas* y *Streptomyces spp.* ⁷⁸.

c) Biocoagulantes a base de microorganismos

Este tipo de biocoagulantes incluye hongos, bacterias y levaduras y el criterio de selección del microorganismo depende de su forma y capacidad para producir sustancias poliméricas extracelulares (EPS), como polisacáridos ⁷³.

1.6. Nopal (*Opuntia ficus indica*)

El nopal (*Opuntia ficus indica*) es una planta cactácea ampliamente distribuida en la mayoría de zonas áridas del mundo y América Central ⁷⁹, perteneciente a la familia Cactaceae, conocida por el nombre de nopal y por su gran producción de mucilago, el cual es un hidrocoloide que emplean las mismas cactáceas para retener agua, mediante la formación de redes moleculares.

Tabla 8. Composición promedio por cada 100 gramos de cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*).

Composición promedio por 100 gramos de cladodio	
Agua (g)	91.7
Proteínas (g)	1.1
Lípidos (g)	0.2
Ceniza (g)	1.3
Fibra cruda (g)	1.1
Carbohidratos complejos (g)	4.6
Azúcares simples (g)	0.82
Ácido ascórbico (mg)	12.7
Carotenos (µg)	28.9

Nota: Tomado de Hernandez-Becerra et al. ⁸⁰.

1.6.1. Mucílago de nopal

El mucilago se ha estudiado y presenta propiedades como coagulante/floculante natural, biosorbente. Las células mucilaginosas están distribuidas en la pulpa y cáscara de los cladodios, los cuales se han empleado por siglos en Latinoamérica para remoción de turbidez en manantiales naturales. Aun así, su escalado industrial es poco factible por la falta de sustentabilidad en relación al proceso productivo de toda la planta, motivo por el cual se le emplea a escala semi-industrial^{79,81,82}. En el tratamiento de aguas puede actuar como adsorbente debido a su naturaleza de polielectrolito, teniendo la capacidad de precipitar iones y partículas en suspensión⁸³⁻⁸⁵. El mecanismo de coagulación del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) está dado por la adsorción de partículas coloidales, tanto en la cadena principal como en las cadenas laterales de los polisacáridos. Como segunda parte del mecanismo, se da la formación de puentes, en términos de partícula-polisacárido-partícula. Por lo general, el mucilago del nopal (*Opuntia ficus indica*) está tiene un peso molecular de 3×10^6 g/mol y posee polisacáridos pépticos, no polisacáridos y electrolitos, como Ca^{2+} y Mg^{2+} , los cuales potencian la formación de complejos al tener un efecto sinérgico sobre la coagulación. Se conoce que está compuesto principalmente 24.6-42% de L-arabinosa, 8-12.7% de ácido D-galacturónico, 21-40.1% de D-galactosa, 7-13.1% de L-ramnosa, 22-22.2% de D-xilosa y trazas de minerales. Hay otros compuestos que se han reportado últimamente por RMN, los cuales son galactano, xiloarabinano, ácido láctico, D-manitol, ácido piscídico, ácido eucómico y ácido 2-hidroxi-4(4'-hidroxifenil)-butanoico⁸⁶⁻⁸⁸, entre otros. El ácido D-galacturónico puede encontrarse también en su forma polimerizada de ácido poligalacturónico, el cual está reportado como el compuesto principal que brinda la capacidad de coagulación, monómeros debido a su carga aniónica y tamaño, los cuales por medio de la adsorción disminuyen el potencial alrededor de las partículas coloidales. Esto es debido a la presencia de los grupos carboxilo e hidroxilo presentes en el biopolímero⁸⁹.

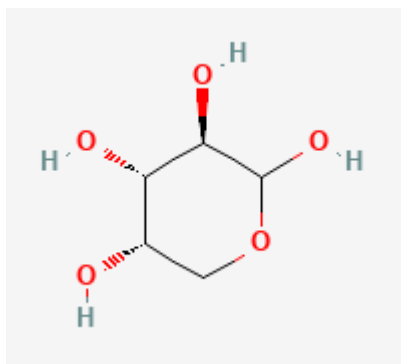


Figura 3. Estructura molecular de L-arabinosa ⁹⁰.

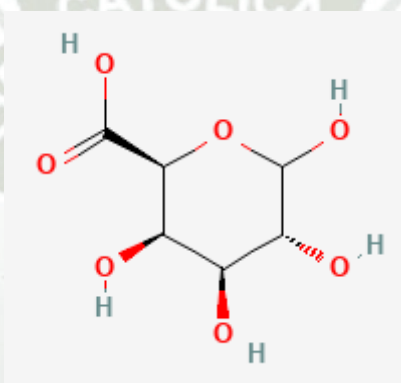


Figura 4. Estructura molecular de ácido D-galacturónico ⁹¹.

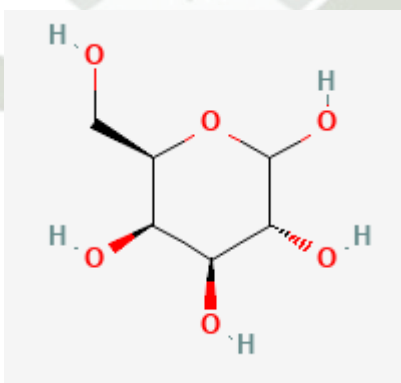


Figura 5. Estructura molecular de D-galactosa ⁹².

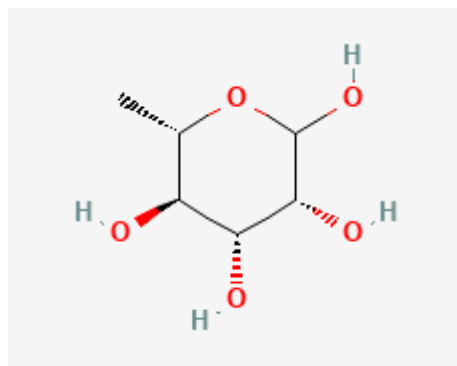


Figura 6. Estructura molecular de L-ramnosa ⁹³.

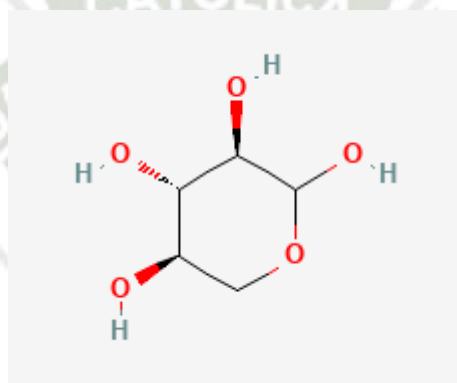


Figura 7. Estructura molecular de D-xilosa ⁹⁴.

1.7. Quitosano

El quitosano es un heteropolisacárido policatiónico lineal ⁹⁵, el cual está formado por cantidades variables de N-acetil-D-glucosamina y D-glucosamina enlazadas por un enlace glucosídico, del tipo β -(1,4) ⁹⁶. Principalmente se produce a partir de la quitina, por medio de la desacetilación, siendo sus principales fuentes las conchas de crustáceos, como cangrejos y camarones, sin embargo, también es posible encontrarlo naturalmente en hongos (*Mucoraceae*, *Mucor rouxii*) ⁹⁷⁻⁹⁹.

El empleo de este biopolímero para tratar efluentes o aguas residuales se debe básicamente por sus propiedades coagulantes y floculantes, pudiendo remover el color, iones metálicos, biocompuestos, turbidez, sólidos en suspensión. Forma complejos insolubles en agua al

interaccionar con polielectrolitos presentes en el efluente. Sus usos principalmente se dan por ventajas como no toxicidad, facilidad de ser sintetizado y bajo costo, biodegradabilidad, estable al usar y almacenar y facilidad de regeneración cuando pierde su actividad ^{100,101}. Es soluble en ácidos débiles, mientras que no lo es en medios con un pH por encima de 7, y en cuanto a sus grupos funcionales presentes, posee una amina primaria y dos grupos hidroxilo libres para cada monómero ^{102,103}. Estos grupos funcionales mencionados son de interés porque influye directamente sobre la densidad de carga en diversas condiciones.

1.7.1. Caracterización del quitosano

a) Peso molecular

Se define como el número de unidades de azúcar por molécula de polímero, el cual oscila entre 50-2000KDa. Las propiedades fisicoquímicas que pueda presentar el quitosano como viscosidad, solubilidad, adsorción depende de ello. También afecta el tamaño del cristal y el tamaño morfológico, pues, al aumentar el peso molecular, disminuye la cristalinidad de la membrana. Puede determinarse por métodos como viscosimetría, Cromatografía de exclusión molecular, dispersión de la luz, Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC), Desorción/Ionización Láser Asistida por Matriz con Tiempo de Vuelo (MALDI-TOF) ^{99,103}.

b) Grado de desacetilación

La desacetilación es un proceso que puede darse biológicamente (quitina desacetilasa) o químicamente (NaOH concentrado). Consiste en hidrolizar los grupos acetamino (-NHCOCH₃) para lograr obtener grupos amino primarios (-NH₂). El grado de desacetilación se da entre 0-100%. Cuando el polímero posee un grado de desacetilación superior o igual al 50% se le denomina quitosano. Un mayor grado de desacetilación se asocia a una mayor solubilidad (en medio acuoso ácido) y densidad de carga del biopolímero. La densidad de carga positiva del quitosano es la capacidad que presenta de pasar su grupo amino -NH₂ a -NH³⁺ por medio de la protonación. Se puede determinar mediante técnicas como espectroscopia infrarroja, espectrofotometría ultravioleta, espectroscopía de RMN de ¹H y ¹³C, titulación potenciométrica, titulación conductimétrica y calorimetría diferencial de barrido ^{99,100,104}.

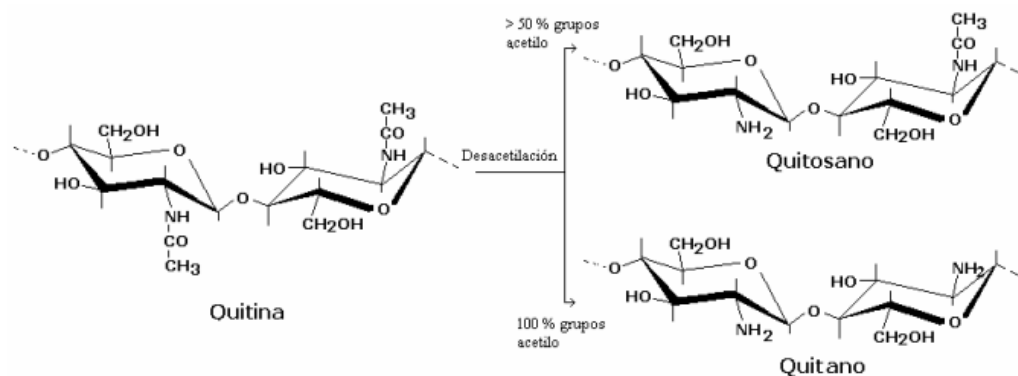


Figura 8. Quitina y su denominación posterior al proceso de desacetilación, en base a los grupos acetilo presentes ⁹⁷.

1.8. Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Es una técnica empleada para obtener el espectro infrarrojo (FTIR) de absorción, emisión y fotoconductividad de líquidos, gases y sólidos, identificando cualitativamente y cuantificando los grupos funcionales presentes en la muestra. Este tipo de espectrometría le debe su funcionamiento al interferómetro, el cual es un dispositivo óptico, siendo capaz de producir una señal única, la cual incluye a todas las frecuencias infrarroja, superando así las desventajas de los espectrofotómetros FTIR tradicionales, los cuales eran instrumentos dispersivos, de lento escaneo y que medían las frecuencias infrarrojas de manera individual. La región infrarroja se divide en los siguientes intervalos: infrarrojo cercano ($400\text{-}10\text{cm}^{-1}$), infrarrojo medio ($4000\text{-}400\text{cm}^{-1}$) e infrarrojo lejano ($14000\text{-}4000\text{cm}^{-1}$), siendo la segunda de las regiones mencionadas que se emplea en sí. La radiación infrarroja con respecto a una molécula solo se da en determinadas longitudes de onda y frecuencias, pues, los enlaces químicos solamente vibran en frecuencias características. Parte de esta radiación infrarroja es absorbida por la muestra, mientras que la otra parte se transmite, ya que, los enlaces químicos solo absorben radiación en determinadas frecuencias, siempre y cuando coincidan con sus modos de vibración. Finalmente se produce un espectro infrarrojo, donde se incluye los picos de absorción que corresponden a las frecuencias vibratorias de los enlaces químicos. Cada pico de absorción indica la cantidad de material presente. No existen dos compuestos que puedan producir el mismo espectro

infrarrojo, debido a que cada material está compuesto de una manera única, teniendo dispuestos sus átomos de una manera en particular ¹⁰⁵⁻¹⁰⁷.

Sus componentes incluyen una mesa óptica infrarroja, una computadora e impresora, siendo el primero la parte principal. Los componentes de la mesa óptica infrarroja son: fuente de luz infrarroja, diafragma, interferómetro, cámara de muestras, detector, espejos infrarrojos, láser de helio-neón, circuito de control y fuente de alimentación ¹⁰⁸.

El interferómetro emplea un divisor de haz, el cual es un dispositivo semirreflector, fabricado a menudo depositando una fina película de germanio sobre un sustrato plano de bromuro de potasio. Este divisor logra dividir el haz radiante entrante en dos: un rayo que se refleja en un espejo plano y fijo, mientras que el otro se refleja en otro espejo plano que se aleja del haz a milímetros del divisor. La señal resultante, conocida como interferograma, es el resultado de la interferencia entre la trayectoria del haz con longitud fija y del haz que longitud variable, a medida que su espejo se mueve. Sin embargo, para obtener el espectro de frecuencia para el respectivo análisis de material, se debe de decodificar las frecuencias individuales, motivo por el cual se emplea la transformación de Fourier (FT), la cual se lleva a cabo en la computadora ¹⁰⁶.

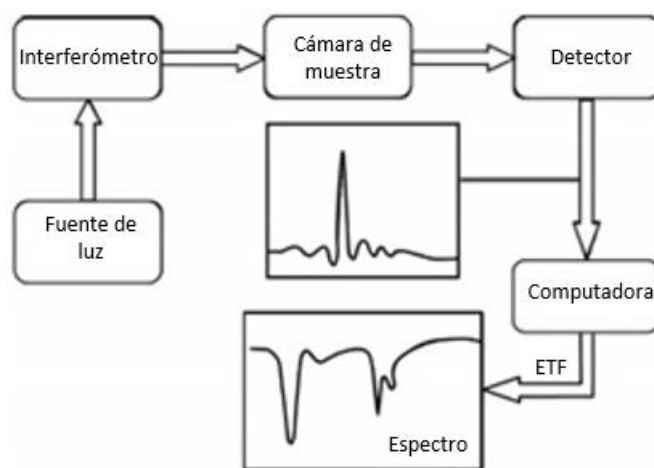


Figura 9. Camino óptico de la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier.

Elaborado en base a Wen y Liu (2021) ¹⁰⁸.

1.8.1. Grupos funcionales y sus absorciones IR características

Tabla 9. Grupos funcionales y sus absorciones IR características.

Grupo funcional	Absorción (cm ⁻¹)	Intensidad
Alcano		
C-H	2850-2960	Media
Alqueno		
=C-H	3020-3100	Media
C=C	1640-1680	Media
Alquino		
≡C-H	3300	Fuerte
C≡C	2100-2260	Media
Halogenuro de alquilo		
C-Cl	600-800	Fuerte
C-Br	500-600	Fuerte
Alcohol		
O-H	3400-3650	Fuerte, amplia
C-O	1050-1150	Fuerte
Areno		
C-H	3030	Débil
Anillos aromáticos	1660-2000	Débil
	1450-1600	Media
Amina		
N-H	3300-3500	Media

Grupo funcional	Absorción (cm ⁻¹)	Intensidad
C-N	1030-1230	Media
Compuesto carbonilo		
C=O	1670-1780	Fuerte
Aldehído	1730	Fuerte
Cetona	1715	Fuerte
Éster	1735	Fuerte
Amida	1690	Fuerte
Ácido carboxílico	1710	Fuerte
Ácido carboxílico		
O-H	2500-3100	Fuerte, amplia
Nitrilo		
C≡N	2210-2260	Media
Nitro		
NO ₂	1540	Fuerte

Nota: Tomado de McMurry¹⁰⁹.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.Lugar de ejecución

El presente trabajo de tesis se desarrolló en la Universidad Católica de Santa María, en los laboratorios F-408 y F-409, los cuales pertenecen al centro de investigación, desarrollo e innovación INNOVERGY (Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables y Medio Ambiente).

2.2.Materiales

2.2.1. Material biológico

- Nopal (*Opuntia ficus indica*)
- Quitina comercial, de la marca Sigma-Aldrich

2.2.2. Insumos

- Etanol 95%
- H₂SO₄
- NaOH
- Fenolftaleína 5%
- KBr
- Ácido acético

2.2.3. Material de vidrio

- Beakers de 100mL, 500mL y 2L
- Probetas de 100mL y 250mL
- Pipetas de 10mL
- Pipeta volumétrica de 10mL
- Fiolas de 100mL, 250mL, 500mL y 1L
- Buretas de 25mL
- Sistema de reflujo

- Matraz kitasato de 250mL
- Placas de Petri

2.2.4. Equipos

- Estufa
- Balanza analítica
- Agitador magnético
- Turbidímetro HI93703-11
- Multiparámetro HANNA HI 5522
- Colorímetro DR900
- Espectrómetro Nicolet™ Summit™
- Digestor DRB 200-1
- Bomba peristáltica
- Cocina eléctrica



2.3. Métodos

2.3.1. Extracción de mucílago a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*) por precipitación con etanol al 95%; y síntesis de quitosano a partir de quitina comercial por desacetilación alcalina

2.3.1.1. Extracción de mucílago a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*) por precipitación con etanol al 95%

a) Proceso de extracción

Se pesaron 9.129Kg de cladodios de nopal, los cuales se lavaron inicialmente con agua corriente. Posteriormente se pelaron, quitando la menor pulpa posible; después se cortaron en trozos de 2cm y se agregaron en un recipiente con agua destilada, considerando una proporción 1:4 (p/p) de acuerdo a la literatura ^{87,110,111}, macerando por un periodo de 24 horas. Una vez pasado el tiempo de maceración, se prensó manualmente el nopal y se filtró empleando gasas.

Al extracto obtenido (6100mL) se le agregó etanol al 95%, considerando una proporción de 1:3 (v/v) por 12 horas ^{87,111}. Pasado el tiempo, se extrajo el sobrenadante y se colocó en placas de Petri. Se lavó con etanol al 95% y se procedió a secar el exceso de solvente por evaporación en la estufa, por un periodo aproximado de 24 horas a 50°C. Este proceso de extracción se puede visualizar en el Anexo 1, desde la Figura 23 a la Figura 26.

Al final se calculó el rendimiento obtenido de empleando la siguiente ecuación ¹¹²:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Peso seco del mucílago extraído (g)}}{\text{Peso fresco total (g)}} \times 100 \quad (1)$$

2.3.1.2. Síntesis de quitosano a partir de quitina comercial por desacetilación alcalina

Para la síntesis se ha dispuesto de un sistema de condensación de reflujo y una solución de NaOH al 70%, con una proporción 1:10 de quitina y NaOH respectivamente ¹¹³.

a) Preparación del NaOH al 70%

Se prepararon 200mL de esta solución, para lo cual se pesó 140g de acuerdo a los cálculos realizados según la ecuación 2.

$$\text{Concentración final} = \frac{\text{masa (g)}}{\text{volumen (mL)}} \times 100 \quad (2)$$

Esta solución se estandarizó y posteriormente se empleó 150mL para el proceso de desacetilación.

Se agregó de a poco las perlas de NaOH a una probeta de 250mL, la cual contenía inicialmente 70mL de agua destilada. Una vez disuelto el NaOH, se enrazó a 200mL y dejó enfriar.

b) Valoración de la solución de NaOH al 70%

Para la valoración se empleó NaOH 1M y HCl 1M, realizando una titulación ácido-base. En primer lugar, se calculó teóricamente la cantidad de moles presentes en la solución de NaOH al 70% de acuerdo a la información de la masa molar brindada en la etiqueta del reactivo químico, la cual fue de 39.997g/mol. Posterior a ello se calculó la molaridad teórica. Ambos cálculos se realizaron empleando la ecuación 3 y 4, respectivamente.

$$\text{Moles de NaOH} = \frac{\text{masa (g)}}{\text{masa molar } \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} \quad (3)$$

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{moles de NaOH}}{\text{volumen (L)}} \quad (4)$$

• Preparación de NaOH 1M

Se preparó a partir de la solución concentrada de NaOH (70% teóricamente), realizando el cálculo proporcionado en el Anexo 5 (Cálculo empleado para determinar el volumen de alícuota a pipetear para preparar NaOH 1M), empleando la siguiente ecuación:

$$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2 \quad (5)$$

- **Preparación de HCl 1M**

Se preparó a partir del HCl concentrado (12.15M), realizando el cálculo proporcionado en el Anexo 5 (Cálculo empleado para determinar el volumen de alícuota a pipetear para preparar HCl 1M), empleando la ecuación 5.

- **Titulación ácido-base**

En un beaker se agregó 10mL del HCl 1M y 5 gotas de una solución de fenolftaleína al 5% y se tituló con el NaOH 1M, anotando el gasto. Concluido este paso se volvieron a emplear las ecuaciones anteriores para determinar la concentración real de la solución de NaOH empleada en la desacetilación de la quitina, la cual teóricamente está al 70%.

Las imágenes relacionadas al proceso de valoración de la solución concentrada de NaOH se puede visualizar en el Anexo 1, Figuras 27 y 28.

- c) **Proceso de desacetilación con NaOH al 70%**

Se pesaron 15.0017g de quitina proveniente de exoesqueleto de camarón, de la marca Sigma-Aldrich, los cuales se mezclaron con 150mL de la solución concentrada preparada de NaOH (relación sólido:líquido 1:10) dentro de un balón esférico el cual luego se instaló en el condensador de reflujo, considerando una temperatura de mezcla de 115°C, por un periodo de 24 horas, con una agitación de 500 RPM. El resultado obtenido se filtró y lavó con agua destilada hasta alcanzar pH neutro con la cinta medidora de pH. Al terminar el ajuste de pH con los lavados, se secó en la estufa a una temperatura de 70°C hasta lograr mantener un peso constante 113 114 .

Las imágenes que corresponden al proceso de desacetilación se pueden visualizar en el Anexo 1, desde la Figura 29 hasta la Figura 33.

d) Purificación

El quitosano secó se disolvió en 500mL de ácido acético al 3% (v/v) y se dejó en reposo hasta el día siguiente. Después se filtró haciendo uso de papel filtro de paso lento y al filtrado se le agregó 300mL de NaOH 1M gota a gota para regenerar el quitosano. Concluida la reprecipitación, se ajustó el pH del quitosano con lavados hasta obtener un pH neutro y se secó al vacío.

Una vez que el quitosano se secó hasta obtener peso constante, se molió en el mortero y se dializó por 3 días a 5°C, dispersando el biocoagulante en agua destilada y empleando celofán como membrana semipermeable ¹¹³. Este proceso de purificación se puede visualizar en el Anexo 1, desde la Figura 34 hasta la Figura 37.

Al final de todo, se calculó el rendimiento mediante el empleo de la siguiente ecuación ¹¹⁵:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{gramos de quitosano}}{\text{gramos de quitina}} \times 100 \quad (6)$$

2.3.2. Caracterización de la obtención del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano

2.3.2.1. Caracterización de mucílago de nopal por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) (*Opuntia ficus indica*)

El mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) se caracterizó por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier, empleando el Espectrómetro FTIR Nicolet™ Summit™.

a) Elaboración de la pastilla

Se pesó 0.001g del coagulante seco obtenido. La cantidad de biocoagulante pesado se mezcló con bromuro de potasio (KBr) para la elaboración de la pastilla, considerando una proporción 1:60 de muestra y bromuro de potasio respectivamente para su lectura en el FTIR.

b) Análisis instrumental

Se empleó un portaobjetos con una cavidad en el centro, donde se colocó la pastilla elaborada y se procedió a analizar la muestra, considerando para la configuración del equipo una resolución de 4cm^{-1} , 1000 escaneos acumulativos y un rango de $4000\text{-}400\text{cm}^{-1}$ ^{79 116}.

Las imágenes que corresponden a la caracterización de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) se pueden visualizar en el Anexo 1, Figuras 39 y 40.

2.3.2.2. Caracterización de quitosano por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier

El quitosano sintetizado se caracterizó por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier, empleando el Espectrómetro FTIR Nicolet™ Summit™.

a) Elaboración de la pastilla

Se pesó 0.001g de quitosano, el cual se mezcló con bromuro de potasio (KBr) para la elaboración de la pastilla, considerando una proporción 1:60 de muestra y bromuro de potasio respectivamente para su lectura en el FTIR ¹¹⁴.

b) Análisis instrumental

Se empleó un portaobjetos con una cavidad en el centro, donde se colocó la pastilla elaborada y se procedió a analizar la muestra, considerando para la configuración del equipo una resolución de 4 cm^{-1} , 1000 escaneos acumulativos y un rango de $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ ¹¹⁴.

Las imágenes que corresponden a la caracterización quitosano por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier se pueden visualizar en el Anexo 1, Figuras 41 y 42.

- **Determinación de los grados de desacetilación**

Se empleó la siguiente ecuación para determinar los grados de desacetilación, haciendo uso de las absorbancias obtenidas en los número números de onda sugeridos ¹¹⁷.

$$GD = 100 - \left(\frac{A_{1320}}{A_{1420}} - 0.3822 \right) / 0.03133 \quad (7)$$

2.3.3. Interpretar los biocoagulantes elaborados a partir de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano

2.3.3.1. Preparación de biocoagulante compuesto por mucílago extraído de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano

Los biocoagulantes se prepararon a partir de las soluciones 1.5g de quitosano en 100mL de ácido acético al 1% (v/v) y 1.5g de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) en 100mL de agua destilada, considerando las siguientes relaciones Q/M (Quitosano/Mucílago): 0.25, 0.5 y 0.75.

Una vez preparadas ambas soluciones, se procedió a agregar la solución de coagulante de nopal gota a gota con ayuda de una bureta, agitando a 600-650 RPM y considerando una temperatura interna de 60°C (monitoreando con un termómetro digital), dejando que homogenice por un periodo de 3 horas después de terminar de agregar la solución de mucílago ^{118,119}. La mezcla obtenida se vertió en placas de Petri y se dejó en estufa durante por un periodo de 4 horas a 40°C, con la finalidad de que el solvente se evapore en su totalidad ¹²⁰.

La imagen que corresponde al proceso de elaboración de los biocoagulantes se puede visualizar en el Anexo 1 (Figura 43).

2.3.4. Evaluación de la eficiencia del biocoagulante compuesto por mucilago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano a diferentes proporciones como pretratamiento alternativo de un efluente lácteo

2.3.4.1. Obtención de la muestra de lactosuero

La muestra de lactosuero se obtuvo de una industria láctea ubicada en Majes, Arequipa-Perú, que realiza el procesamiento de productos lácteos como quesos y yogurt de diferentes tipos. La muestra se tomó de un tanque que almacena el suero de queso tras el proceso de cuajado de leche.

a) Desgrasado de lactosuero

El lactosuero se desgrasó al dejar el recipiente que lo contenía dentro de la refrigeradora, a 4°C por un periodo de 24 horas. Pasado el tiempo se empleó la bomba al vacío para retirar el lactosuero libre de grasa, quedando esta última en la superficie.

El proceso de desgrasado de lactosuero se puede visualizar en el Anexo 1, desde la Figura 44 hasta la Figura 46.

2.3.4.2. Caracterización inicial de la muestra de lactosuero

Para esta primera caracterización del lactosuero se tomaron los parámetros de pH, turbidez, conductividad eléctrica y TDS.

Los equipos empleados fueron HANNA HI 5522 (equipo multiparámetro de pH, conductividad eléctrica y TDS) y HANNA HI 93703 (medidor de turbidez).

Para la lectura de pH, conductividad eléctrica y TDS se llenó un beaker de 100mL con la muestra de lactosuero y se procedió a realizar la lectura con el equipo HANNA HI 5522. En cuanto a la turbidez se empleó una celda de vidrio que previamente fue acondicionada, llenándola con 10mL de muestra y procediendo a realizar la lectura en el equipo respectivo.

2.3.4.3.Preparación de la muestra

El frasco que contenía al lactosuero desgrasado se homogenizó por inversión. Una vez realizado ese paso, se transfirieron 100mL a una fiola de 1L (dilución 1:10), aforando adecuadamente, consiguiendo una turbidez de 140 NTU (la muestra preparada se puede visualizar en el Anexo 1, Figura 47).

Al haber preparado la muestra se hizo una segunda caracterización inicial, considerando los mismos parámetros tomados en cuenta en la primera caracterización inicial y procediendo de la misma forma, realizando adicionalmente el análisis de DQO. Este ensayo emplea generalmente ácido sulfúrico, dicromato de potasio, sulfato de plata y sulfato de mercurio como parte del medio de digestión química, de acuerdo a lo establecido en la literatura ³⁸.

a) Análisis de DQO

Se tomó una alícuota de 1mL de la muestra preparada y se transfirió a una fiola de 100mL (dilución 1:100). La solución se homogenizó por inversión tras ajustar al volumen final. Posteriormente se pipetearon 2.5mL a un vial de DQO de rango bajo (0-100mg/L), homogenizando nuevamente por inversión. Luego se digestó a 150°C durante 2 horas. Finalizado el tiempo de digestión, se dejó enfriar el vial de DQO y se realizó la lectura en el colorímetro DR900 empleando el rango de calibración respectivo (rango bajo).

Finalmente se determinó cuantitativamente el valor real de DQO presente en la muestra tratada empleando la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{DQO de la muestra tratada} = X \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{DQO de la lectura} \times 100 \quad (8)$$

2.3.4.4.Estrategias experimentales

Para la evaluación del efecto de las tres variables independientes (pH, temperatura y relación Q/M) con respecto a las variables dependientes (turbidez y DQO) se procedió de la siguiente manera: en cuanto a la turbidez se empleó el diseño experimental de Taguchi, el cual consideró

tres niveles para cada variable independiente mencionada, realizando nueve ensayos por triplicado, lo que da un total de veintisiete experimentos; se empleó el criterio de optimización “más grande es mejor” ya que la evaluación del biocoagulante compuesto también tiene como objetivo maximizar la remoción de turbidez. Para la evaluación de DQO se aplicó el análisis únicamente al resultado óptimo del Diseño Experimental mencionado, obteniendo el porcentaje de remoción de DQO al realizar la comparativa con el valor inicial de DQO obtenido en la segunda caracterización inicial.

La configuración de los ensayos fue proporcionada mediante el empleo del software estadístico Minitab, pudiéndose apreciar en la Tabla 10:



Tabla 10. Diseño experimental a realizar (Taguchi).

Nº corrida	Bloques	Quitosano/Mucilago	Temperatura, °C	pH
1	1	0.25	25	3.5
2	1	0.25	25	3.5
3	1	0.25	25	3.5
4	1	0.25	50	6
5	1	0.25	50	6
6	1	0.25	50	6
7	1	0.25	75	8.5
8	1	0.25	75	8.5
9	1	0.25	75	8.5
10	1	0.5	25	6
11	1	0.5	25	6
12	1	0.5	25	6
13	1	0.5	50	8.5
14	1	0.5	50	8.5
15	1	0.5	50	8.5
16	1	0.5	75	3.5
17	1	0.5	75	3.5
18	1	0.5	75	3.5
19	1	0.75	25	8.5
20	1	0.75	25	8.5
21	1	0.75	25	8.5
22	1	0.75	50	3.5
23	1	0.75	50	3.5
24	1	0.75	50	3.5
25	1	0.75	75	6
26	1	0.75	75	6
27	1	0.75	75	6

Se le añadió 0.01g del biocoagulante en polvo correspondiente a cada ensayo (Anexo 1, Figura 48). Los ensayos consistieron en realizar un proceso de coagulación a 200 RPM por un periodo de 5 minutos, seguido de la floculación a 70 RPM por un periodo de 30 minutos. Culminado el tiempo de cada ensayo se dejó enfriando las muestras (si lo requiere, dependiendo de la temperatura de trabajo), para posteriormente dejar sedimentando por un periodo de 24 horas a 4°C.

a) Análisis de DQO al resultado óptimo

El análisis de DQO se realizó transfiriendo 40mL de efluente tratado de cada triplicado a un beaker de 150mL. Se homogenizó la muestra y se pipeteó una alícuota de 1mL para transferirla a una fiola de 100mL, obteniendo de esta manera una dilución (1:100). Luego de llevarlo a volumen, se homogenizó por inversión. Posteriormente se pipetearon 2.5mL a un vial de DQO de rango bajo (0-100mg/L), homogenizando nuevamente por inversión. Luego se digirió a 150°C durante 2 horas (proceso visualizado en Anexo 1, Figura 49). Finalizado el tiempo de digestión, se dejó enfriar el vial de DQO y se realizó la lectura en el colorímetro DR900 empleando el rango de calibración respectivo (rango bajo).

Para determinar el valor de DQO se empleó la ecuación 8.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Extracción de mucílago a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*) por precipitación con etanol al 95%; y síntesis de quitosano a partir de quitina comercial por desacetilación alcalina

Como parte de este primer objetivo específico, se procedió a calcular el rendimiento obtenido de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano.

3.1.1. Extracción de mucílago a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*) por precipitación con etanol al 95%

3.1.1.1. Rendimiento obtenido

Al evaporarse completamente el solvente empleado para la extracción del coagulante, se procedió a moler la biopelícula formada en la superficie. El polvo fino se lavó tres veces con etanol al 95% y el resultado final fue de un color amarillo, presentando un rendimiento de 63.3781g.



Figura 10. Polvo fino de coagulante de nopal (*Opuntia ficus indica*).

De acuerdo a los cálculos realizados empleando la ecuación 1 para determinar el porcentaje de rendimiento en peso fresco del nopal (Anexo 5), se obtuvo finalmente un 0.69%.

En la literatura se ha llegado a reportar rendimientos de alrededor del 2% en peso fresco, mientras que en peso seco los valores son cercanos al 19% ¹²¹. Los motivos que influyen en el rendimiento que se vaya obtener son diversos, como es el caso del tipo de cultivo con el que se trabaja, edad del cultivo ¹¹², e inclusive, por las condiciones climáticas dadas en el momento en el que se recolecta los cladodios de nopal, como por ejemplo en situaciones de estrés de frío o lluvia ¹²². Con respecto a la edad del cultivo, Vargas-Solano et al. (2022) ¹²³ sugiere que hay una tendencia a aumentar la producción de compuestos urónicos a medida que los nopales alcanzan un mayor grado de maduración, reportando gráficos IR en los que evidencia que los más maduros son los que presentan bandas relacionadas a enlaces C=O, C-H y O-H con mayor intensidad. Los parámetros y condiciones de extracción también son un motivo a considerar para poder optimizar el rendimiento de coagulante extraído, como el tipo y volumen empleado de solvente (dependiendo del método), técnicas empleadas como el prensado mecánico y molienda, entre otras de gran incidencia ¹²¹. Con respecto al tema de la temperatura se ha podido conocer que un aumento ligero a 40°C promueve la obtención de un mejor rendimiento de mucílago extraído, tal como reporta Luna-Sosa et al. (2022) ¹¹², además de comentar que no debe de exponerse la materia prima ni el producto final a una temperatura mayor o igual a 90°C ya que los polisacáridos comienzan a degradarse a partir de ese punto, motivo por el cual el proceso de extracción y almacenamiento del mucílago de nopal no involucró temperaturas cercanas o mayores a lo recomendado. Adicionalmente, es vital considerar importante la relación nopal:agua y tiempo de maceración, ya que el mismo autor reportó un rendimiento de 1.56% de mucílago de nopal en peso fresco empleando una relación 1:7 de nopal:agua, 40°C y 4h de extracción, mientras que un rendimiento de 1.33% fue obtenido considerando una relación 1:5 de nopal:agua, 16°C y 8 horas de extracción. Esto nos da a entender que hay variables clave sobre las cuales uno puede trabajar en caso de que se opte por optimizar el proceso de extracción de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) en caso de que se busque mejorar el rendimiento u obtención.

3.1.2. Síntesis de quitosano a partir de quitina comercial por desacetilación alcalina

3.1.2.1. Valoración de la solución de NaOH al 70%

Al finalizar el proceso de titulación se realizó un gasto de 10.2mL de NaOH 1M (Figura 14), al llegar al punto final de neutralización de los 10mL de HCl 1M. Se puede observar el color rojo grosella en la Figura 15, el cual es característico al llegar al punto final; esto nos indican que hay una cantidad relativamente igual en cuanto a número de moles por volumen de 10.2mL NaOH en 10mL de HCl 1M.



Figura 11. Gasto obtenido en el proceso de titulación ácido-base.



Figura 12. Punto final alcanzado en el proceso de titulación ácido-base.

Las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 se emplearon para hallar la concentración real de la solución de NaOH que se empleó en el proceso de la desacetilación alcalina de la quitina (Anexo 5). La concentración real de la solución inicial de NaOH que se empleó en la titulación fue de 0.98M, la cual sirvió para calcular la molaridad real de la solución de NaOH que se usó en la síntesis de quitosano, dándonos un valor de 17.16M. Posterior a ello se halló el número de moles presentes en dicha solución en base al dato anterior, el cual nos dio como resultado 3.432 moles. Esta cantidad de número de moles se multiplicó por la masa molar de las perlas de NaOH empleadas (39.997g/mol), dándonos 137.27g como producto de dicha operación. Finalmente, la división entre los 137.2g de NaOH y 200mL de volumen de solución empleada nos da una concentración real de 68.6% de NaOH. Este paso es muy importante a realizar antes del proceso de desacetilación, el cual se fundamenta en verificar que la solución de NaOH tenga la concentración deseada, que en este caso es cercano al 70% que buscamos y se puede emplear sin ningún problema.

3.1.2.2. Rendimiento obtenido

El peso total del quitosano sintetizado fue de 8.4341g, obtenido a partir de 15.0017g de quitina.



Figura 13. Quitosano seco.

El resultado obtenido de acuerdo a los cálculos proporcionados en Anexo 5 (Rendimiento obtenido en la síntesis de quitosano) luego de emplear la ecuación 6 es el siguiente:

Tabla 11. Rendimiento obtenido luego de la síntesis de quitosano.

Temperatura (°C)	Tiempo	Conc. NaOH (%)	Relación sólido:líquido (g/mL)	Rendimiento (%)
115	24h	68.6	1:10	56.22

Los parámetros elegidos estuvieron basados en dos metodologías que realizaron la síntesis de quitosano por medio de un proceso de desacetilación alcalina, de entre las cuales una propone una serie de pasos para obtener un quitosano de alta pureza, motivo por el cual adicionalmente se realizó un proceso de purificación que involucró hacer precipitar el quitosano preparado previamente en solución (500mL al 30% (p/v) al titularse con una solución alcalina (NaOH 1M), para posteriormente lavarlo, secarlo y dializarlo por un periodo de tres días (72h). Los parámetros de 115°C, 24 horas de reacción y relación sólido:líquido 1:10 se consideraron de la metodología mencionada anteriormente, la cual corresponde al autor Omar et al. (2022)¹¹³, mientras que la concentración teórica sugerida de 70% fue proporcionada por parte del autor de Queiroz et al. (2017)¹¹⁴, el cual coincidió con únicamente la temperatura empleada, difiriendo en los demás valores de las otras variables, las cuales fueron de 4-6h y relación sólido:líquido 1:15, además de involucrar un proceso de ultracongelación previo a la desacetilación, en el cual tras mezclar la solución alcalina con la quitina, lo congeló a -83°C por 24h. Conociendo que la concentración de la solución alcalina es relevante en la síntesis del quitosano, es por eso que se empleó la concentración ya mencionada a modo de exploración y, aun así, pudo obtenerse un rendimiento del 56.22%.

Con respecto a la agitación empleada en la reacción química, las metodologías proponen una velocidad de agitación de 200-250RPM, sin embargo, al no observar una buena agitación es que se optó por aumentar la velocidad de agitación hasta 500RPM. No pareciera que influya negativamente por lo observado en el rendimiento que se logró obtener, sin embargo, también

es un factor a considerar porque en una reacción química como la desacetilación alcalina es importante que la quitina se encuentre interaccionando en su totalidad con la solución alcalina, sin sedimentar como sucedería en el caso que se emplee una velocidad de agitación inferior a lo debido.

A continuación, se muestra la siguiente tabla que plasma los rendimientos de quitosano obtenidos posterior a un proceso de desacetilación alcalina, de acuerdo a lo reportado en la bibliografía:

Tabla 12. Rendimientos obtenidos en la literatura empleando condiciones distintas.

Temperatura (°C)	Tiempo	Conc. NaOH (%)	Relación sólido:líquido (g/mL)	Rendimiento (%)	Referencia
120	6h	20	1:20	13.70	Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵
100	6h	40	1:20	19.80	Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵
80	6h	20	1:50	28.80	Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵
90	50min	50	1:20	35	Srinivasan et al. (2018) ¹²⁴
90	30h	50	No especifica	65.84-75.52	Soon et al. (2018) ¹²⁵

Nota: Tomado de Mathaba y Daramola ¹¹⁵, Srinivasan et al. ¹²⁴, Soon et al. ¹²⁵

Según la Tabla 12, se puede ver que de acuerdo a la literatura se ha reportado rendimientos en el rango de 13.70-75.52%.

En los tres primeros casos de las autoras Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵ se puede observar que emplea temperaturas relativamente altas (80-120°C), tiempos de reacción moderados (6h) y concentraciones de NaOH inferiores al 50%, logrando obtener hasta un rendimiento máximo de

30%. En el caso del máximo rendimiento que corresponde al autor Soon et al. (2018) ¹²⁵, se puede observar que empleó una temperatura de 90°C, 30h de reacción y 50% de NaOH, a modo de comparación, Srinivasan et al. (2018) ¹²⁴ al disminuir el tiempo de reacción a 50min logra obtener 35% rendimiento, siendo superior al de los tres rendimientos reportados por Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵. Tomando en cuenta las temperaturas relativamente altas que emplean los casos descritos se puede sugerir bajo esta condición que hay cierta influencia de la concentración alcalina y tiempo de reacción, no siendo necesarios tiempos de reacción moderados o alrededor de 6h si va a emplearse una solución más concentrada de NaOH, aun así, Soon et al. (2018) ¹²⁵ usa 30h con NaOH al 50% y logra obtener el máximo rendimiento reportado en la Tabla 12. Como información adicional brindada por el último autor, el grado de acetilación que presente la quitina influye también en el rendimiento, ya que, al usar tres muestras de quitina con distinto grado de acetilación, específicamente 82.39%, 93.83% y 101.39%, logró obtener rendimientos de 65.84%, 70.88% y 75.52% respectivamente. Esto podría servir como recomendación, en caso de que se opte por optimizar el rendimiento al investigar factores que se vean involucrados.

3.2. Caracterización de la obtención de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano

3.2.1. Caracterización de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Esta caracterización tuvo como finalidad identificar a los grupos funcionales principales que forman parte de la estructura del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y que están involucrados en su potencial como agente coagulante.

Al realizar el análisis de FTIR se obtuvo el siguiente espectro, visible en la Figura 17:

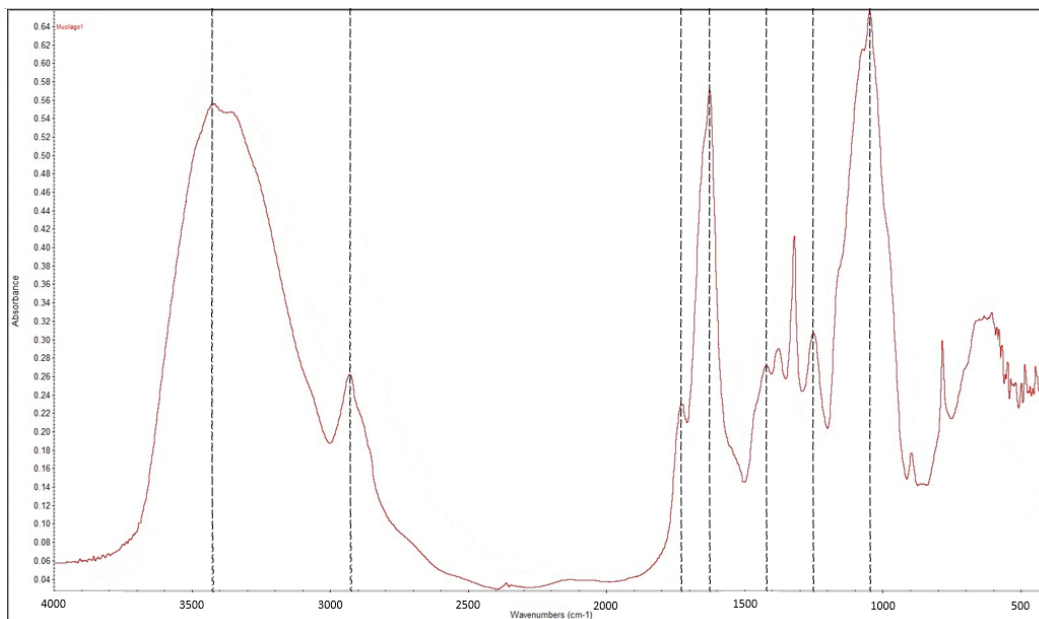


Figura 14. Espectro FTIR del mucílago extraído de nopal (*Opuntia ficus indica*).

El espectro mostró una banda ancha de intensidad alta entre 3000-3700 cm^{-1} , con un pico máximo de absorción a 3420 cm^{-1} aproximadamente, atribuida al estiramiento del enlace O-H de los grupos hidroxilo pertenecientes a los grupos carboxilo y alcohol, característicos de los polisacáridos presentes en el coagulante, de acuerdo a lo comentado por el autor Otálora et al. (2021) ⁸⁷. En otros trabajos dedicados a la identificación del mucílago de nopal se ha podido visualizar esta banda característica, como en el caso de los autores Otálora et al. (2022) ⁷⁹ y Choudhary et al. (2019) ⁸⁸, quienes observaron los picos máximos de absorción a 3358 cm^{-1} y 3329 cm^{-1} , respectivamente. Adicionalmente, el autor Choudhary et al. (2019) ⁸⁸ reporta el estiramiento del enlace N-H, el cual se encuentra superpuesto en la misma banda ancha atribuida al estiramiento del enlace O-H, debido a la presencia de grupos amino en la composición del biocoagulante. La banda de intensidad media con un pico máximo de absorción aproximado a 2930 cm^{-1} se atribuye al estiramiento del enlace C-H, tal como reportan Vargas-Solano et al. (2022) ¹²³ y Luna-Sosa et al. (2022) ¹¹² a 2932 cm^{-1} y 2800 cm^{-1} respectivamente, el cual debe su presencia a azúcares como xilosa, ramnosa, arabinosa, galactosa y ácidos urónicos como el caso del ácido galacturónico, los cuales presentan estructuras cíclicas. El espectro presentó una banda de alta intensidad entre 1560 y 1710 cm^{-1} , con un pico máximo de

absorción a 1630 cm^{-1} aproximadamente, atribuida al estiramiento del enlace carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) característico de los grupos carboxilo que componen sus compuestos urónicos. Asimismo, se observó una banda de intensidad media con un pico máximo de absorción a 1730 cm^{-1} aproximadamente, correspondiente al estiramiento del grupo carbonilo presente en compuestos urónicos y otras estructuras cíclicas propias del mucílago de nopal. Estos resultados coinciden con los reportados por el autor Otálora et al. (2022)⁷⁹, cuyos picos máximos de absorción se identificaron a 1605 cm^{-1} y 1746 cm^{-1} respectivamente. Empezando con la región de huella dactilar, pudo identificarse una banda de intensidad media con un pico máximo de absorción a 1420 cm^{-1} aproximadamente, atribuida al estiramiento del enlace $\text{C}-\text{O}$ ⁷⁹; el autor Otálora et al. (2022)⁷⁹ identificó este pico de absorción a 1396 cm^{-1} . Aproximadamente a 1250 cm^{-1} se ha podido identificar el pico máximo de absorción de una banda de intensidad media, debiéndose esto al estiramiento del enlace $\text{C}-\text{O}-\text{H}$ (baja intensidad), presente en los grupos carboxilo, así como también a 1050 cm^{-1} se pudo identificar el pico máximo de absorción de una banda de alta intensidad, la cual es característica del estiramiento del enlace $\text{C}-\text{O}-\text{C}$, el cual forma parte de los azúcares y enlace glucosídico. El autor Otálora et al. (2022)⁷⁹ también ha podido identificar estas dos picos de absorción a 1260 cm^{-1} y 1020 cm^{-1} respectivamente.

3.2.2. Caracterización de quitosano por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Al realizar el análisis de FTIR se obtuvo el siguiente espectro con respecto al quitosano, visible en la Figura 18:

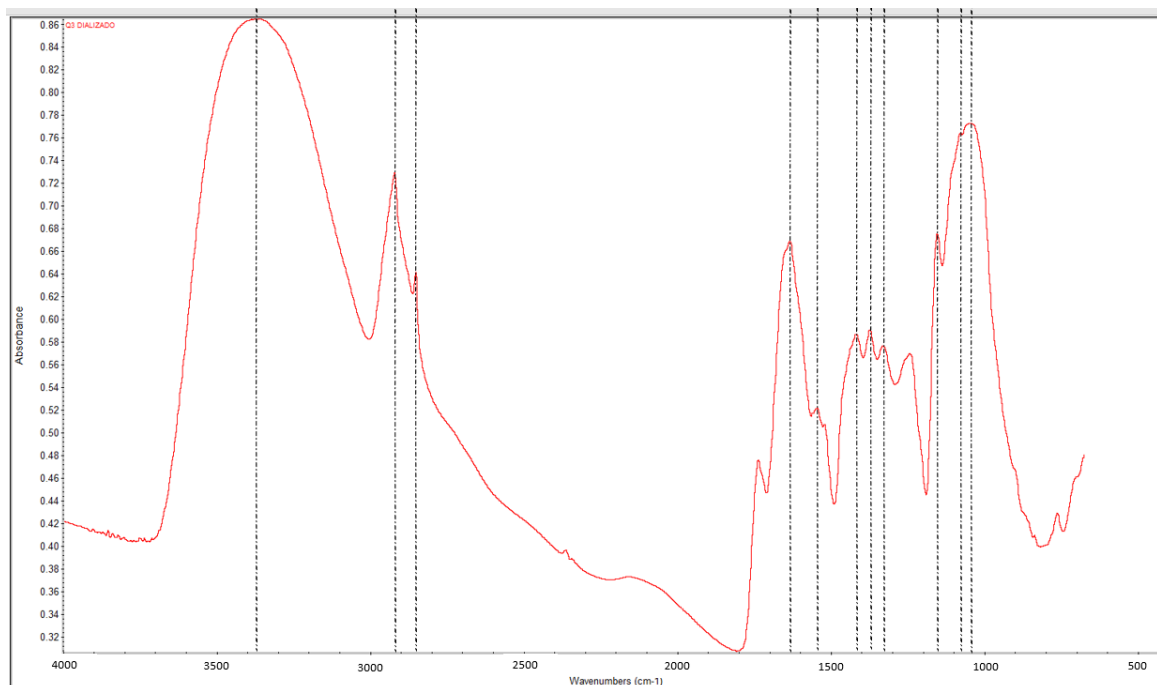


Figura 15. Espectro FTIR del quitosano purificado.

Se ha podido identificar una primera banda ancha de intensidad alta entre $3000\text{--}3670\text{cm}^{-1}$, mostrando un pico máximo de absorción a 3370cm^{-1} , el cual está atribuido principalmente al estiramiento del enlace O-H, presente en toda la cadena de este biopolímero como grupo hidroxilo. Resultados similares se han podido observar en los espectros IR publicados por los autores Queiroz et. al (2014)¹²⁶ y Tanhaei et al. (2016)¹²⁷, ubicando dicha banda ancha entre $3291\text{--}3610\text{cm}^{-1}$ y $3000\text{--}3750\text{cm}^{-1}$ respectivamente. Adicionalmente, los autores comentaron que en esa banda se superpone la banda de absorción que indica estiramiento del enlace N-H (similar en el espectro del mucílago de nopal), debido a los grupos amina formados posterior al proceso de desacetilación, además de posibles grupos amida que no sufrieron cambios en la reacción química. Por otro lado, se observaron dos bandas con picos máximos de absorción a 2920cm^{-1} y 2850cm^{-1} , las cuales se atribuyen al estiramiento asimétrico y simétrico del enlace C-H, respectivamente. Estos resultados coincidieron con los reportados por Queiroz et al. (2014)¹²⁶ y Tanhaei et al. (2016)¹²⁷, quienes identificaron dichas vibraciones a 2921cm^{-1} y 2877cm^{-1} , y a 2921cm^{-1} y 2880cm^{-1} , respectivamente. Se pudo identificar otra banda, con un pico máximo de absorción a 1620cm^{-1} aproximadamente, la cual corresponde al estiramiento

del enlace C=O, debido a la presencia de grupos amida remanentes. Esta banda también se ha podido identificar en el artículo de investigación del autor Varan (2017)¹²⁸, a 1650cm^{-1} . Otra banda se pudo identificar, la cual presentó un pico máximo de absorción a 1550cm^{-1} , aproximadamente, correspondiendo a la flexión del enlace N-H, asociado con los grupos amina primarios resultantes del proceso de desacetilación de la quitina. Los autores Queiroz et. al (2014)¹²⁶ y Varan (2017)¹²⁸ coinciden con la identificación de esta banda, localizando su pico máximo de absorción a 1589cm^{-1} y 1559cm^{-1} , respectivamente. Empezando con la región de huella dactilar, se pudo identificar seis bandas de absorción, cuyos picos máximos de absorción se encuentran aproximadamente a 1410cm^{-1} , 1360cm^{-1} , 1310cm^{-1} , 1100cm^{-1} , 1020cm^{-1} y 1000cm^{-1} . Las dos primeras bandas fueron atribuidas a la flexión C-H¹²⁸. El autor Queiroz et. al (2014)¹²⁶ ha podido localizarlas a 1423cm^{-1} y 1375cm^{-1} , mientras que el autor Varan (2017)¹²⁸ las identifica a 1425cm^{-1} y 1385cm^{-1} . Con respecto a la tercera de absorción identificada, fue atribuida al estiramiento del enlace C-N, de acuerdo a la interpretación de los autores Queiroz et al. (2014)¹²⁶ y Colina et al. (2014)¹²⁹, quienes la localizan a 1325cm^{-1} y 1318cm^{-1} , respectivamente. Con respecto a la cuarta banda identificada, se debe al estiramiento asimétrico del enlace C-O-C, característico del enlace glucosídico que une a las unidades de N-acetil-D-glucosamina y D-glucosamina⁹⁶, mientras que la presencia de la quinta y sexta banda se debe al estiramiento C-O. El autor Queiroz et. al (2014)¹²⁶ coincide en la identificación de estas tres últimas, localizándolas a 1153cm^{-1} , 1066cm^{-1} y 1028cm^{-1} .

3.2.2.1. Determinación de grados de desacetilación

Para poder determinar los grados de desacetilación, la metodología que brindó la ecuación sugirió tomar en consideración para los cálculos a las absorbancias obtenidas a longitudes de onda de 1320cm^{-1} y 1420cm^{-1} , de las cuales una corresponde al grupo funcional amida (II), y la otra al enlace $-\text{CH}_2$, de acuerdo a las autoras Rohyami y Sari (2021)¹³⁰. Según Fatima (2019)¹¹⁷, la banda a 1320cm^{-1} guarda relación con la amina acetilada que se encuentra en la estructura de la quitina, mientras que la banda del enlace $-\text{CH}_2$ a 1420cm^{-1} sirve como una banda de referencia. Pese a lo indicado en la literatura, en nuestro espectro FTIR del quitosano se dichas bandas se encuentran ubicadas a 1335cm^{-1} y 1420cm^{-1} , pudiéndose apreciar dicha información en la Figura 19:

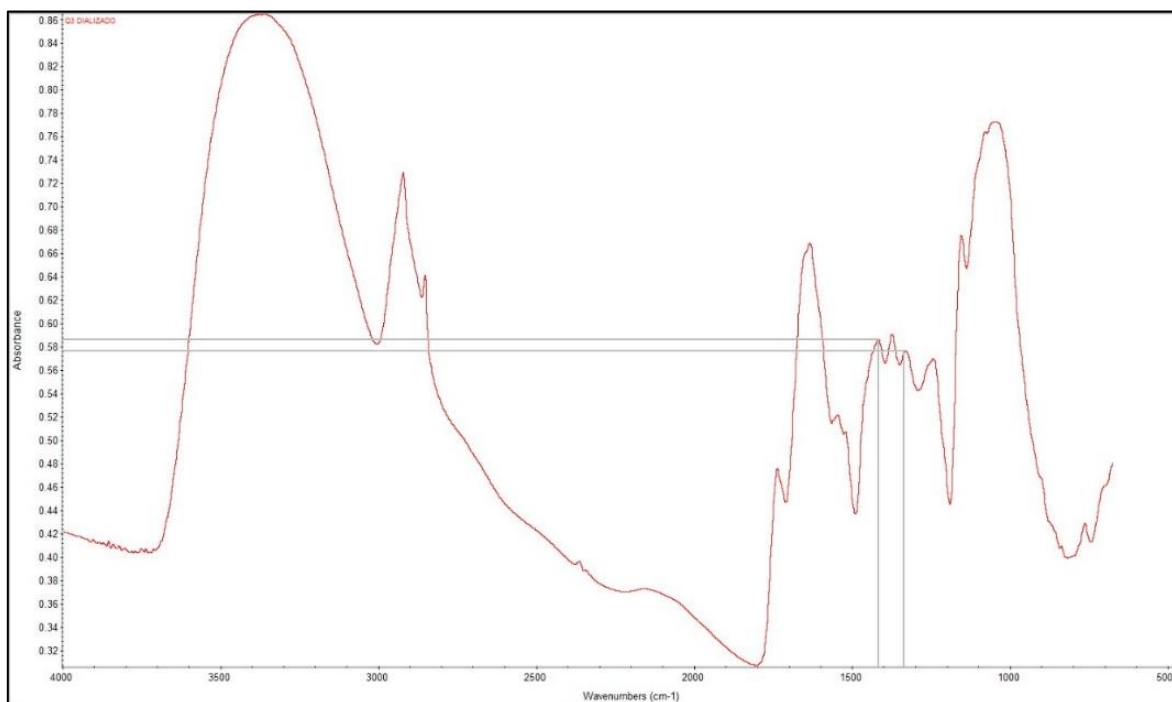


Figura 16. Bandas amida II y $-CH_2$.

Con respecto a las absorbancias, a 1335cm^{-1} tenemos una absorbancia de 0.576, mientras que a 1420cm^{-1} podemos visualizar que su absorbancia brinda un valor de 0.588. Estos valores al sustituirlos en la fórmula brindada por la literatura (ecuación 7), nos dan el siguiente porcentaje de grados de desacetilación (cálculos en Anexo 5, Grados de desacetilación del quitosano sintetizado):

Tabla 13. Grados de desacetilación presentes en el quitosano sintetizado.

Temperatura (°C)	Tiempo	Conc. NaOH (%)	Relación sólido:líquido (g/mL)	Grados de desacetilación (%)
115	24h	68.6%	1:10	80.93

El valor de 80.93% como grado de desacetilación indica que efectivamente hay presencia de quitosano como producto obtenido posterior al proceso de desacetilación de la quitina, habiendo empleado condiciones de 115°C, tiempo de reacción de 24h, concentración de 68.6% de la solución alcalina y una relación sólido:líquido de 1:10. Esta afirmación se respalda con información brindada en la literatura, como es el caso del autor Novikov et al. (2023) ¹³¹, el cual comenta que lo único que diferencia a la quitina del quitosano es la cantidad de grupos amino presentes en la quitina que van reemplazando a los grupos amida, lo cual se traduce en grados de desacetilación, y cuando este valor es mayor al 50% se le puede denominar como ‘quitosano’ al producto final.

La importancia de obtener un grado de desacetilación alto radica en la relación que guarda con la densidad de carga que el coagulante pueda proporcionar en los ensayos de coagulación y floculación, tal como lo reportado por Bahlkaran y Wilson (2016) ¹³², el cual comenta que un quitosano con el grado de desacetilación más alto es capaz de sedimentar rápidamente los contaminantes presentes en el sistema coloidal, brindando los porcentajes de turbidez más bajos. De manera similar comenta el autor Kim (2018) ¹³³, el cual informa que los grados de desacetilación son un factor crítico a considerar, ya que está directamente relacionado con el comportamiento catiónico que este pueda presentar. Habiendo comentado esto, se podría inferir que la dosificación empleada puede variar dependiendo de la densidad de carga que presente el biocoagulante, coincidiendo con el comentario del autor Hassan (2009) ¹³⁴, sin embargo, esto se discutirá más a profundidad en la sección experimental.

Con respecto al método de desacetilación alcalina que se empleó, este consiste básicamente en la hidrólisis de los grupos de los grupos acetamida o acetilo, los cuales al interactuar en la reacción química con la solución alcalina de NaOH permite la formación de grupos amino en el lugar ¹³¹. La hidrólisis mencionada se da porque el ion hidróxido (OH⁻), el cual proviene de la disociación del NaOH, ataca a los grupos acetilados que se encuentran anclados al nitrógeno del C2 (carbono-2) a lo largo de toda la estructura de quitina, debido al carácter altamente nucleofílico del ión hidróxido (OH⁻) que da lugar a un mecanismo de adición-eliminación nucleofílica. El ácido acético (COOHCH₃) que se va formando en medio de la reacción química deja al nitrógeno de la quitina cargado negativamente, el cual posteriormente logra su saturación al ser suministrado de un ión hidrógeno (H⁺) por parte del grupo carboxilato presente en la

molécula de ácido acético, dando lugar así a la formación de aminas primarias (-NH₂) a lo largo de la estructura del polímero. El ión carboxilato (R-COO⁻) y ión sodio (Na⁺) residuales al tener carga negativa y positiva respectivamente, se juntan por afinidad o atracción electrostática y logran formar acetato de sodio como subproducto de la reacción ^{135 129}.

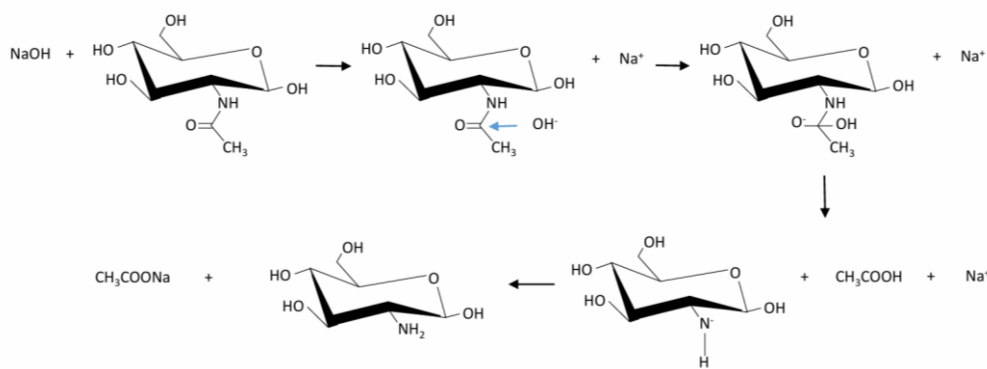


Figura 17. Mecanismo de reacción del proceso de desacetilación de la quitina. Elaborado en base a Rujiravanit et al. (2020) ¹³⁵ y Colina et al. (2014) ¹²⁹.

De acuerdo a la autora Colina et al. (2014) ¹²⁹, el empleo de altas temperaturas en la desacetilación alcalina de la quitina se debe a tres razones principales. El primer motivo consiste en la baja reactividad de la quitina ocasionada por la configuración trans de los radicales acetamida con respecto al grupo hidroxilo que se encuentra unido al C3 (carbono-3) del anillo piranósico en cada unidad monomérica. En segunda instancia está la formación de puentes de hidrógeno entre grupos hidroxilo y carbonilo y amida adyacentes. Por último, el enrejado cristalino de la quitina previene el acceso de la solución alcalina en los sitios reactivos debido al denso empaquetamiento de las cadenas de las unidades repetidas de N-acetil-D-glucosamina que componen este polímero. Adicionalmente comenta que la importancia de sintetizar quitosano en ausencia de oxígeno se debe a que este elemento tiene cierta influencia en la degradación del polímero en cuestión, disminuyendo su viscosidad y peso molecular, siendo este último aspecto de interés, ya que influye en el proceso de floculación, según lo explicado en la bibliografía por Tetteh et al. (2019) ⁶⁶.

A continuación, se muestra una comparativa sobre los grados de desacetilación obtenidos a diferentes condiciones con información reportada en la literatura:

Tabla 14. Parámetros comparativos en la literatura que proporcionan grados de desacetilación variados.

Temperatura (°C)	Tiempo	Conc. NaOH (%)	Relación sólido:líquido (g/mL)	Grados de desacetilación (%)	Referencia
25	75h	35	1:14	6.92	Kandile et al. (2018) ¹³⁶
25	24h	50	1:10	21	Kandile et al.(2018) ¹³⁶
80	6h	20	1:20	33.93	Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵
40	4h	50	No especifica	66	Boudouaia y Bengharez (2019) ¹³⁷
120	6h	20	1:20	79.92	Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵
90	30h	50	No especifica	81.06	Soon et al. (2018) ¹²⁵
100	12h	55	1:5	85.95	Kandile et al. (2018) ¹³⁶
90	4h	50	No especifica	87	Boudouaia y Bengharez (2019) ¹³⁷
115	24h	45-50	1:10	89	Omar et al. (2022) ¹¹³
25	75h	70	1:14	90.40	Kandile et al. (2018) ¹³⁶
115	6h	70	1:15	93.6	de Queiroz et al. (2017) ¹¹⁴
100	6h	40	1:20	95.97	Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵

Nota: Tomado de, Soon et al. ¹²⁵, Omar et al. ¹¹³, de Queiroz et al. ¹¹⁴, Mathaba y Daramola ¹¹⁵, Kandile et al. ¹³⁶, Boudouaia y Bengharez ¹³⁷

En la literatura, de acuerdo a lo plasmado en la Tabla 14, se reporta grados de desacetilación que van desde el 6.92% al 95.97%. Tal como se observa, la distinta configuración de los

parámetros proporciona distintos grados de desacetilación, los cuales involucran temperatura, tiempo de reacción, concentración alcalina y relación sólido:líquido, además podemos conocer que, empleando 100°C, 6h, NaOH al 40% y relación sólido:líquido de 1:20 es que podemos obtener un quitosano con un porcentaje de desacetilación cercano al 95%, siendo el resultado con mayor porcentaje de desacetilación reportado en la bibliografía. A continuación, se procede a realizar una comparativa entre estudios reportados en la bibliografía descrita en la Tabla 14.

En los trabajos de Kandile et al. (2018) ¹³⁶ y Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵, el primer autor realizó una comparativas entre dos ensayos, los cuales mantuvieron condiciones fijas de 25°C y 75h de reacción: con NaOH al 35% obtuvo un grado de desacetilación de 6.92%, mientras que al aumentar la concentración a 70% el valor fue de 90.40%; por parte del segundo autor, empleó NaOH al 20% obtuvo un quitosano con 33.93% de desacetilación, a 80°C y 6h de reacción, cuando en otros trabajos mencionados en la Tabla 16 logran un grado de desacetilación superior al 50% empleando condiciones similares en cuanto a temperatura y tiempo de reacción, pero haciendo uso de una solución de NaOH más concentrada. Según Khairi et al. (2019) ¹³⁸, los grados de desacetilación aumentan a medida que sucede de la misma manera con respecto a la concentración de la solución alcalina de NaOH, habiéndolo comprobado en su trabajo de investigación al hacer uso de concentraciones alcalinas entre 20-70% y logrando un grado de desacetilación del 87.5% a una concentración del 70% de la solución alcalina. Parte de su fundamento está en que una mayor disponibilidad del álcali en la solución aumenta la interacción entre los grupos -OH del NaOH con respecto a los grupos amino de la quitina. Algo similar acotan Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵, explicando que una mayor concentración de la solución alcalina promueve la degradación de los grupos acetilo, dando lugar a la formación de grupos amina. Esto explicaría los resultados descritos que involucran variaciones en la concentración de la solución alcalina.

Con respecto a Omar et al. (2022) ¹¹³ y de Queiroz et al. (2017) ¹¹⁴, ambos emplearon una temperatura de 115°C y concentraciones de NaOH relativamente altas (45-70%), obteniendo 89% y 93.6% de desacetilación respectivamente, con la observación de que los tiempos de reacción tienen mucha diferencia (30h y 6h respectivamente). Algo similar puede evidenciarse en los resultados reportados por Soon et al. (2018) ¹²⁵ y Boudouaia y Bengharez (2019) ¹³⁷, los cuales en este caso mantienen constante la temperatura y concentración de NaOH (90°C y 50%),

sin embargo, el primer trabajo al considerar un tiempo de reacción de 30h logró obtener 81.06% de grados de desacetilación, mientras que el segundo trabajo al considerar un tiempo de reacción más bajo que fue de 4h obtuvo 87%. En otro contexto experimental pero evidenciando a la vez la influencia del tiempo de reacción, el autor Potivas y Laokuldilok (2014) ¹³⁹ comenta que al aumentar progresivamente el tiempo de reacción desde 2 hasta 5 horas logró ir aumentando los grados de desacetilación, obteniendo desde 15.24% hasta 70.19%. Nos da a entender de que el tiempo de reacción también es un factor crítico a considerar si se desea obtener un producto final con alto grado de desacetilación, pues en lo descrito por el último autor se explica que incluso en un tiempo de reacción con rango de trabajo reducido (120-300min) se observa una gran diferencia en cuanto a grados de desacetilación que se logran conseguir. Por lo tanto, en el estudio se ve únicamente la influencia de tiempo de reacción en un proceso de desacetilación de la quitina podría apoyarse con el estudio de la cinética de reacción, con la finalidad de observar los grados de desacetilación que se van obteniendo a través del tiempo.

Los autores Kandile et al. (2018) ¹³⁶ y Omar et al. (2022) ¹¹³, emplearon condiciones iguales para tiempo de reacción y concentración alcalina (24h y NaOH al 50%), con la siguiente variación donde el primero optó por 25°C, obteniendo 21% en cuanto a sus grados de desacetilación, en cambio el otro autor empleó 115°C y logró obtener un 89%. El autor Boudouaia y Bengharez (2019) ¹³⁷ ha proporcionado información también sobre el efecto de temperatura en los grados de desacetilación, con valores fijos para tiempo de reacción y concentración de NaOH (4h y 50%): a 40°C obtuvo una desacetilación del 66% y a 90°C este valor fue de 87%. Una comparación similar realizan Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵, el cual empleó condiciones fijas de 6h, 20% y 1:20: a 80°C obtuvo una desacetilación de 33.93% y a 120°C el valor fue de 79.92%. Este último autor justifica sus resultados explicando que una mayor energía cinética producida por altas temperaturas promueve la degradación de grupos acetilo. Según el autor Younes et al. (2014) ¹⁴⁰, de acuerdo a sus resultados, la temperatura es el factor principal encargado de controlar el grado de desacetilación generado, seguido de la concentración de la solución alcalina, sin embargo, la Tabla 16 sugiere la idea de que aun así el grado de desacetilación que presente el quitosano toma en cuenta a otros factores que también pueden ser considerados críticos, como el tiempo de reacción y la concentración que presente la solución alcalina, lo cual da lugar a mayor investigación tratando de encontrar un jerarquía en los factores involucrados en la desacetilación alcalina de la quitina.

Específicamente en cuanto a la relación sólido:líquido se puede apreciar que la Tabla 16 evidencia contextos experimentales muy variados que imposibilitan, con respecto a este factor, una comparación teórica lo más cercano a lo real. Usualmente usan relaciones 1:10-1:20, sin embargo, el autor Kandile et al. (2018) ¹³⁶ con una relación 1:5 obtuvo una desacetilación de 85.95% a 100°C, 12h y NaOH al 55%. Haciendo un análisis general, se observa cómo relaciones 1:14 en distintos contextos puede proporcionar desde 6.92% hasta 90.40% en cuanto a grados de desacetilación. Se puede deducir que la influencia sobre los grados de desacetilación en esta comparativa se le atribuyen más a la concentración que presenta la solución alcalina, ya que al aumentar de 35% a 70% de concentración de la solución de NaOH se obtiene el mayor rendimiento mencionado (los demás parámetros son similares), tal como se explicó de acuerdo a Khairi et al. (2019) ¹³⁸ y Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵. En otro ejemplo se puede ver cómo relaciones 1:10 empleados en dos experimentos distintos brindan 21% y 89% en cuanto a grados de desacetilación, sugiriendo que la gran diferencia se le atribuye al incremento de temperatura (los parámetros de % de NaOH y tiempo de reacción son los mismos). En los tres experimentos de la Tabla 14 que emplean relaciones sólido:líquido de 1:20 se aprecia una tendencia similar. De acuerdo a los autores Mathaba y Daramola (2020) ¹¹⁵ y Novikov et al. (2023) ¹³¹, estos apoyan la idea de que la temperatura, el tiempo de reacción y concentración de la solución alcalina tienen un efecto de mayor sobre los grados de desacetilación que se pueda obtener, a comparación de otros factores que puedan verse involucrados, como parece ser el caso de la relación sólido:líquido. Parecen estar en lo correcto, porque se evidencia como el cambio drástico de esos factores influyen drásticamente en los grados de desacetilación obtenidos. Por parte del autor No (2000) ¹⁴¹ en su estudio personal no encontró diferencias significativas al emplear relaciones sólido:líquido 1:15 y 1:10. No se ha logrado encontrar muchos estudios que de manera extensiva estudien exclusivamente el efecto que pueda presentar la relación sólido:líquido sobre los grados de desacetilación en un proceso de desacetilación alcalina, sin embargo, no deja de ser un factor que se ve involucrado en el proceso de desacetilación alcalina, sugiriendo la literatura el uso de una relación sólido:líquido entre 1:5 y 1:20.

Muy aparte de los parámetros involucrados en la desacetilación alcalina, también está la parte operativa que es importante tener en cuenta si se espera obtener un buen espectro IR, lo cual podría influir en el método para determinar los grados de desacetilación (como en este trabajo), previendo posibles problemas de humedad, la configuración de la línea base, señales emitidas

por impurezas presentes en la muestra, resolución espectral, entre otros, de acuerdo a lo que comentan los autores Czechowska-Biskup y Rosiak (2012) ¹⁴². Adicionalmente también comenta que dependiendo del tipo de ecuación a emplear los grados de desacetilación pueden variar, informando que el empleo de este método se recomienda para una estimación aproximada. Del mismo modo coincide el autor Sánchez-Machado et al. (2024) ¹⁴³, que al emplear 4 distintas ecuaciones obtuvo grados de desacetilación de una misma muestra de quitosano que iban desde 72.32% hasta un valor de 98.89%. Tres de esas ecuaciones empleaban las mismas bandas que se emplearon en el cálculo realizado en el presente trabajo, las cuales fueron a longitudes de onda de 1320cm^{-1} y 1420cm^{-1} , obteniendo grados de desacetilación de 74.32%, 85.30% y 97.99%; por otro lado, la ecuación restante emplea bandas a longitudes de onda de 1655cm^{-1} y 3455cm^{-1} , logrando obtener un grado de desacetilación del 98.69%, similar al resultado brindado por la ecuación que emplea las bandas a longitudes de onda de 1320cm^{-1} y 1420cm^{-1} , el cual es del 97.99%.

De acuerdo al método de determinación de grados de desacetilación empleado, es elemental considerar todo aquello que afecte la reproducibilidad de los resultados, y en el caso del quitosano, la variación de resultados no se debe únicamente a los parámetros establecidos en la reacción química de la desacetilación alcalina, sino también a factores operacionales relacionados al equipo que brinda el espectro FTIR por medio del software respectivo, a la ecuación empleada por el método FTIR, así como también a la bibliografía que uno emplee, porque las condiciones varían siempre y se ha reflejado en lo discutido anteriormente.

3.3. Interpretar los biocoagulantes elaborados a partir de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano.

Las biopelículas obtenidas fueron pulverizadas una vez secaron por completo. El color que presentaba cada una variaba en relación a la proporción de la fórmula, siendo evidente la predominancia naranja que presentaban, atribuido al aspecto del quitosano sintetizado.

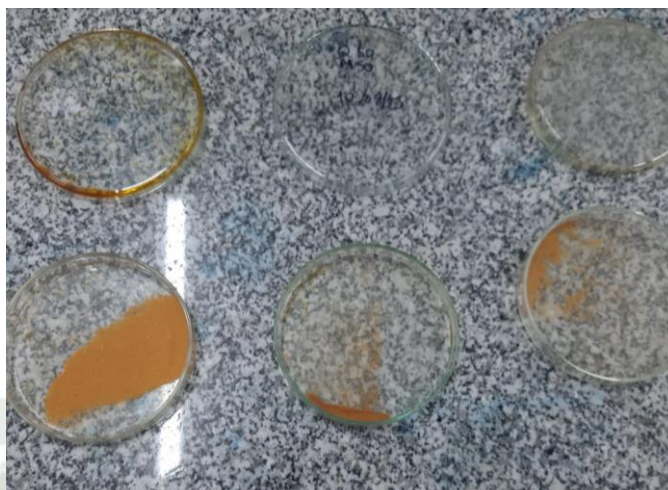


Figura 18. Biopelículas elaboradas con mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano.

A la izquierda 50% Quitosano-50% Mucílago (Q/M; 0.5); al centro 75% Quitosano-25% Mucílago (Q/M; 0.75); a la derecha 25% Quitosano-75% Mucílago (Q/M; 0.25).

Considerando las formulaciones descritas en la Figura 21 y, además, teniendo en cuenta que cada biocoagulante estuvo destinado a ser usado en dosis de 100ppm de acuerdo al experimento respectivo, podemos comentar que de manera teórica hay 75ppm de quitosano y 25ppm de mucílago de nopal en el caso de la relación Q/M de 0.75, 50ppm tanto de quitosano como mucílago de nopal en la relación Q/M de 0.5 y 25ppm de quitosano con 75ppm de mucílago de nopal con respecto a la relación Q/M de 0.25. Al realizar la combinación de ambos biocoagulantes pudo darse un cambio estructural además de un efecto sinérgico entre los grupos funcionales involucrados en los mecanismos de coagulación y floculación. Estos grupos funcionales, los cuales se encuentran presentes en el quitosano y mucílago extraído de nopal cumplen una función importante en el proceso mencionado porque en este tema de biorremediación son los encargados de desestabilizar el sistema coloidal presente en el efluente debido a los mecanismos de coagulación que emplean, dependiendo de la suspensión coloidal además de facilitar la sedimentación con el empleo de la floculación. También es importante conocer la influencia de la densidad de carga que presenten ya que guarda relación con las concentraciones de las especies iónicas correspondientes, según Kallay et al. (2006)¹⁴⁴; estas especies iónicas presentes en cada biocoagulante puede determinarse mediante el potencial Zeta, el cual mide la cantidad de cargas que portan las partículas, de acuerdo a lo que comenta la

autora Sharma (2019) ¹⁴⁵. El quitosano posee gran cantidad de grupos hidroxilo y amino primarios, los cuales estos últimos, dependiendo del pH van a tener un comportamiento distinto; en un medio ácido es altamente soluble, debido a que sus grupos amino se protonan ($-\text{NH}_2$ pasa a la forma ionizada $-\text{NH}_3^+$), dándole el comportamiento de polímero catiónico, sin embargo, en soluciones acuosas neutras o alcalinas su solubilidad se reduce, según los autores Coleman et al. (2024) ¹⁴⁶ y Yang et al. (2016) ¹⁴⁷. De acuerdo al autor Holmes et al. (2022) ¹⁴⁸ el mecanismo de coagulación y floculación por parte del quitosano se da principalmente neutralización de carga y puenteo entre partículas. El puente entre partículas también se da entre los flóculos debido a que el quitosano es un polisacárido lineal, uniéndose electrostáticamente en diferentes lugares a lo largo de la cadena. Dependiendo de la concentración de las cargas positivas que posea el quitosano se podría dar un mecanismo de “parche” electrostático, según Bhalkaran y Wilson (2016) ¹³² y Nath et al. (2021) ¹⁴, ya que, los polielectrolitos con una densidad de carga catiónica superior logran adsorberse en la superficie del contaminante con una densidad de carga aniónica inferior. Este mecanismo se da a cabo porque reduce las interacciones repulsivas entre las partículas presentes en el sistema coloidal, dando lugar a la compresión de la doble capa eléctrica. Nath et al. (2021) ¹⁴ comenta también que el quitosano puede presentar un mecanismo de coagulación por barrido, el cual depende en sí de una gran cantidad de coagulantes a emplear, lo cual resulta en un precipitado que termina atrapando las partículas coloidales remanentes. Con respecto al mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) se le conoce por su composición principal a base de carbohidratos como D-galactosa, L-arabinosa, L-ramnosa, D-xilosa y ácido galacturónico, además de la presencia de electrolitos como Ca^{2+} y Mg^{2+} , los cuales mejoran la formación de complejos debido al efecto sinérgico en conjunto ¹⁴⁹; adicionalmente se presume la presencia de galactano y xiloarabinano ⁸⁸. El autor Contreras et al. (2015) ¹⁵⁰ sugiere que el ácido galacturónico es el principal agente coagulante presente en el mucílago debido a que en especies vegetales como el nopal se le encuentra como ácido poligalacturónico, una forma polimérica que posee carga aniónica, cuyos grupos carboxílicos que se encuentran presentes a lo largo de la cadena son capaces de absorber químicamente a las partículas que se encuentran en suspensión en el agua. Por otro lado, el autor Bouaouine et al. (2019) ¹⁵¹ comenta que los grupos fenólicos que pueden estar presentes en el coagulante extraído pueden complementar el proceso de coagulación y floculación, como quercetina y almidón. La naturaleza aniónica del mucílago extraído, debido a la presencia de grupos $-\text{OH}$, $-\text{CO}$ y $-\text{COOH}$, sugiere que sus

mecanismos de coagulación y floculación se dan a través de puente de adsorción, ya que, se da una interacción dipolo-dipolo entre el mucílago con los cationes divalentes como el Ca^{2+} y Mg^{2+} ⁷⁹.

La finalidad de obtener el biocoagulante compuesto por mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano era evaluar el comportamiento en conjunto de ambos coagulantes naturales en un tratamiento de efluente lácteo por coagulación y floculación. Es bien conocido actualmente que hay coagulantes que pueden obtenerse de origen animal, vegetal e inclusive de microorganismos. Con respecto a los coagulantes naturales, usualmente se componen de una combinación de múltiples macromoléculas, como carbohidratos, proteínas y lípidos, siendo los aminoácidos y los polímeros de los polisacáridos los principales constituyentes ¹⁵². La información con respecto a este tema abunda en la literatura, reconocido la capacidad que poseen de remover contaminantes expresados en diversos parámetros, como turbidez, DQO, DBO, metales pesados, etc., tratando con aguas residuales provenientes de distintas industrias, aguas sintéticas, y en algunos casos muestras de recursos hídricos naturales como ríos, por ejemplo. Dentro de esas industrias se ha investigado el empleo del mucílago extraído del nopal, así como el quitosano en tratamientos de remediación de efluentes lácteos. Adicionalmente, también se ha reportado trabajos de en los que se ha investigado la tanto la combinación entre coagulantes naturales y coagulantes químicos, así como mezclas entre coagulantes naturales con el propósito de evaluar su eficiencia en cuanto a remoción de contaminantes. Esta información se detallará de forma resumida a continuación.

Tabla 15. Biocoagulantes reportados en la literatura para tratar aguas residuales.

Biocoagulante	Tipo de efluente	Turbidez/DQO inicial	Condiciones de operación	Resultados	Referencias bibliográficas
<i>Moringa oleifera</i>	Industria láctea	648 NTU	400ppm pH 6.5	65.6% remoción de turbidez	Deepa et al. (2022) ¹⁵³
<i>Opuntia ficus indica</i>	Refinería de aceite vegetal	2654 NTU 48241mg/L de DQO	40ppm pH 9.87	99% remoción de turbidez 76% remoción de DQO	Dkhissi et al. (2023) ¹⁵⁴
<i>Cicer arietinum</i>	Industria del petróleo	435 NTU	1.5ppm pH 7	98.2% remoción de turbidez	Eh et al. (2018) ¹⁵⁵
Quitosano	Efluente lácteo sintético	698 NTU 3037.5mg/L de DQO	73.34ppm pH 5	97.60% remoción de turbidez 77.50% remoción de DQO	Muniz et al. (2022) ¹⁵⁶
<i>Opuntia ficus indica</i>	Curtiembre	548 NTU 16000mg/L de DQO	400ppm pH 5.5	62% remoción de turbidez 75% remoción de DQO	Kazi y Virupakshi (2013) ¹⁵⁷
Quitosano	Industria del papel	2816mg/L de DQO	300ppm pH 6	78% de remoción de DQO	Kaur et al. (2020) ¹⁵⁸
<i>Cáscara de naranja</i>	Industria láctea	260 NTU	200ppm pH 7.5	97% remoción de turbidez	Mophin-Kani (2016) ¹⁵⁹
Semillas de tamarindo	Aguas residuales de detergentes	1670 NTU 1118.64mg/L de DQO	400ppm pH 7.25	97.01% remoción de turbidez 24.86% remoción de DQO	Ronke et al. (2016) ¹⁶⁰

Nota: Tomado de Deepa et al. ¹⁵³, Dkhissi et al. ¹⁵⁴, Eh et al. ¹⁵⁵, Muniz et al. ¹⁵⁶, Kazi y Virupakshi ¹⁵⁷, Kaur et al. ¹⁵⁸, Mophin-Kani ¹⁵⁹, Ronke et al. ¹⁶⁰

En la Tabla 15 se puede observar que el coagulante que fue extraído de las semillas de garbanzo (*Cicer arietinum*) a pH 7 y con una dosis de 1.5ppm ha sido capaz de remover el 98.2% de

turbidez en un efluente procedente de la industria del petróleo, el cual presentaba una turbidez inicial de 435 NTU, de acuerdo al autor Eh et al. (2018) ¹⁵⁵. El autor Ronke et al. (2016) ¹⁶⁰ reportó que el empleo del coagulante procedente de las semillas de tamarindo pudo remover el 97.01% de la turbidez y 24.86% de DQO en aguas residuales de detergentes empleando 400ppm y pH 7.25, las cuales presentaban inicialmente 1670 NTU y 1118.6mg/L de DQO. Adicionalmente, también se ha registrado en la bibliografía el empleo de *Moringa oleífera* y la cáscara de naranja para tratar efluentes de la industria láctea, los cuales pudieron remover un 65.6% y 97% de turbidez respectivamente. También se puede evidenciar los empleos del quitosano y nopal (*Opuntia ficus indica*). En cuanto al quitosano, este fue empleado para tratar un efluente lácteo sintético y otro procedente de la industria del papel, de acuerdo a Muniz et al. (2022) (150) y Kaur et al. (2020) (152); en el primer artículo se logró remover 98.83% de turbidez y en el segundo 78% de DQO. En cuanto a lo proporcionado por la Tabla 16, *Opuntia ficus indica* presenta aplicaciones para tratar efluentes de curtiembre y de refinерías de aceite vegetal de acuerdo a los autores Kazi y Verupakshi (2013) (151) y Dkhissi et al. (2023) (148); en el primer artículo se logró remover 62% de turbidez y 75% de DQO, mientras que el segundo artículo se logró remover 99% de turbidez y 76% de DQO.

Teniendo esta información, se puede conocer que, dentro de toda la aplicación que pueda tener la materia biológica como agente coagulante, también se incluye al quitosano y nopal (*Opuntia ficus indica*). Con el propósito de obtener un contexto más específico se buscó información bibliográfica sobre la aplicación del nopal y quitosano para tratar efluentes lácteos. El alcance respectivo se plasmó en la siguiente tabla:

Tabla 16. Empleo de mucílago de *Opuntia ficus indica* y quitosano en tratamiento de efluentes lácteos.

Biocoagulante	Turbidez/DQO inicial	Condiciones de operación	Resultados	Referencias bibliográficas
Mucílago de <i>Opuntia ficus indica</i>	361 NTU 2895mg/L de DQO	400ppm pH 4.18	76.90% remoción de turbidez 26.80% remoción de DQO	Chuiza-Rojas et al. (2019) ¹⁶¹
	863 NTU	60ppm pH 7	86.91% remoción de turbidez	Lisintuña et al. (2020) ¹⁶²
Quitosano	745.6 NTU 4153mg/L de DQO	100ppm pH 7	93% remoción de turbidez 79% remoción de DQO	Geetha Devi et al. (2013) ¹⁶³
	210 NTU	25ppm pH 7	99% remoción de turbidez 70% remoción de DQO	Chi y Cheng (2006) ¹⁶⁴

Nota: Tomado de Chuiza-Rojas et al. ¹⁶¹, Lisintuña et al. ¹⁶², Geetha Devi et al. ¹⁶³, Chi y Cheng ¹⁶⁴

De acuerdo a la información plasmada en la Tabla 16, se ha reportado el empleo del mucílago de nopal; por parte de Chuiza-Rojas et al. (2019) ¹⁶¹ se ha dado a conocer que el mucílago pudo remover el 76.90% y 26.80% de turbidez y DQO respectivamente, empleando condiciones de 400ppm y pH 4.18. En cuanto a Lisintuña et al. (2020) ¹⁶² se ha dado a conocer una remoción de turbidez del 86.91% a condiciones de 60ppm y pH 7; el efluente presentaba inicialmente 863 NTU. Con respecto al quitosano se ha reportado por parte de Geetha Devi et al. (2013) ¹⁶³ una remoción de 93% de turbidez y 79% de DQO, con condiciones óptimas de 100ppm y pH 7 (745.6 NTU y 4153mg/L de DQO iniciales); en el otro caso reportado por Chi y Cheng (2006) ¹⁶⁴ se logró remover 99% de turbidez y 70% de DQO, con condiciones óptimas de 25ppm y pH 7 (210 NTU iniciales).

Teniendo en consideración la información proporcionada y que a pesar de que no hay trabajos

de investigación en los que se haya empleado específicamente un biocoagulante compuesto por nopal y quitosano para tratar algún efluente, se hizo una revisión bibliográfica donde reporten la mezcla de diversos coagulantes en general, los cuales dependiendo de la combinación brindan diversos resultados. Se muestra a continuación:

Tabla 17. Mezcla de coagulantes empleadas para tratar efluentes.

Procedencia del efluente	Coagulantes empleados	Caracterización inicial	Condiciones de operación	Resultados	Referencias bibliográficas
Agua sintética	<i>Opuntia ficus indica</i>	200 NTU	30ppm	75.2% remoción de turbidez	Hashim et al. (2017) 165
	<i>Opuntia ficus indica</i> + alumbre	200 NTU	Dosis en relación 0.5:0.5	89.8% remoción de turbidez	
Agua residual con azul de metileno	Quitosano+Lignina	10ppm de colorante	2g (1:1) pH 7	95% de colorante	Vedula y Yadav (2022) ¹¹⁸
Efluente textil	<i>Aloe vera</i> + cloruro férrico	14.37 NTU 1067.58mg/L de DQO	4ppm+260ppm pH 5	97.81% remoción de turbidez 60.40% de DQO	Figueiredo et al. (2022) ¹⁶⁶
Procesamiento húmedo del café	<i>Acanthus sennii</i> + <i>Aloe vera</i> + <i>Moringa stenopetala</i>	20.21mg/L de nitrato 9.10mg/L de fosfato	0.75g (total) pH 8.76	99.12% remoción de nitrato 99.63% remoción de fosfato	Getahun et al. (2023) ¹⁶⁷

Nota: Tomado de Vedula y Yadav ¹¹⁸, Hashim et al. ¹⁶⁵, Figueiredo et al. ¹⁶⁶, Getahun et al. ¹⁶⁷

Los autores Figueiredo et al. (2022) (160) y Hashim et al. (2017) (159) reportaron el uso de combinación de coagulantes naturales con coagulantes químicos. El primero autor evidencia el efecto que puede tener la combinación de coagulantes: logró remover la turbidez un 75.2% al

aplicar 30ppm de mucílago de nopal a un agua residual sintética, pero al mezclarlo con alumbre (dosis en relación 0.5:0:5) pudo promover la remoción de turbidez, llegando hasta una remoción máxima de 89.8%. El segundo autor evidencia un trabajo similar, en el que mezcló 4ppm mucílago de *Aloe vera* y 260ppm de cloruro férrico, logrando remover 97.81% de la turbidez y 60.40% de DQO a pH 5 (14.37 NTU y 1067.58mg/L de DQO iniciales).

Por otro lado, también se ha reportado el empleo exclusivo de coagulantes naturales que han podido remover contaminantes expresados en parámetros distintos a la turbidez y DQO. Los autores Vedula y Yadav (2022) (113) realizaron una combinación de quitosano y lignina con la finalidad de remover el 95% de colorante de un agua residual que tenía altas concentraciones de azul de metileno, empleando 1g de cada biocoagulante y a pH 7. Por último, el autor Getahun et al. (2023) (161) reportó una combinación de la planta *Acanthus sennii*, sábila (*Aloe vera*), y moringa africana (*Moringa stenopetala*) también en un proceso de coagulación, logrando remociones de 99.12% para nitratos y 99.63% para fosfatos, empleando 0.75g de la combinación y a pH 8.76.

La revisión realizada confirma que los coagulantes naturales en la actualidad son muy investigados por la presencia de agentes coagulantes y floculantes en su composición, además de evidenciar su posible aplicación en la industria láctea, sugiriendo además la posible combinación de estos para promover la remoción de contaminantes. La información brindada por la bibliografía justifica el empleo de este biocoagulante compuesto de coagulante extraído de nopal y quitosano, teniendo como finalidad evaluar su comportamiento en un efluente lácteo, aplicando el diseño de experimental pertinente y parámetros de pH, temperatura y relación Q/M (Quitosano/Mucílago).

3.4. Evaluación de la eficiencia del biocoagulante compuesto por mucilago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano a diferentes proporciones como pretratamiento alternativo de un efluente lácteo

3.4.1. Caracterización inicial del lactosuero

Para la primera caracterización del lactosuero se realizó la medición de los parámetros de turbidez, pH, TDS y conductividad eléctrica (CE), con el efluente en crudo (previamente desgrasado).

Los valores de pH, turbidez, TDS y CE fueron de 3.688, mayor a 1000 NTU, 2814ppm y 5631 μ S/cm respectivamente. En cuanto a la turbidez, el valor “mayor a 1000” se debió a que el equipo empleado para medir turbidez (HANNA HI 93703) solo podía leer hasta máximo 1000 NTU. Por otro lado, con las lecturas realizadas se pudo conocer que el lactosuero tratado era ácido, el cual por lo general tiene un pH alrededor de 4.5 debido a procesos de coagulación ácida o láctica de la caseína involucrados en la producción de quesos, según Hernández et al. (2012)⁵⁰. Un lactosuero con pH de 3.688 podría indicar la presencia de microorganismos involucrados en la generación de ácido láctico por procesos de fermentación, tal como sugiere el autor Singh (2016)⁴⁷ al informar que la contenido orgánico presente en este tipo de efluentes convierte las aguas residuales en medios con sustrato ideal para la fermentación bacteriana.

3.4.2. Ensayo sobre el efecto del biocoagulante compuesto a diferentes proporciones de mucilago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano en muestra de lactosuero

3.4.2.1. Segunda caracterización de lactosuero

Antes de proceder a realizar los ensayos respectivos, se realizó una segunda caracterización, aplicando una dilución 1:10 para el lactosuero. Se midieron los mismos parámetros considerados para la primera caracterización inicial, realizando adicionalmente el análisis de DQO.

Al diluir por un factor 1:10 se obtuvo un lactosuero con 140 NTU. Los valores de pH, TDS y Conductividad Eléctrica fueron 3.716, 1016ppm y 2027 μ S/cm respectivamente. La finalidad de esta dilución estaba en adecuar principalmente la turbidez, estableciéndola dentro de un rango de trabajo ideal. Autores como Koul et al. (2022)⁷⁸ y Vijayaraghavan et al. (2011)¹⁶⁸ mencionan que, de forma general, los biocoagulantes son muy eficaces para remediar aguas o aguas

residuales con un rango de turbidez bajo-medio, específicamente entre 50-500NTU, sin embargo, la Tabla 17 muestra el empleo de mucílago de nopal y quitosano exclusivamente para tratamiento de efluentes lácteos por coagulación y floculación, con un rango de turbidez inicial entre 210-863NTU, logrando remover entre 76.90% hasta 99% de turbidez. Teniendo esta información en cuenta y, además, considerando que inicialmente el turbidímetro no era capaz de proporcionar resultados de turbidez en muestras con más de 1000NTU, se optó por realizar la dilución empleada en el presente trabajo antes del tratamiento de coagulación y floculación.

Con respecto a la determinación de DQO, el valor de 50mg/L se obtuvo en la lectura realizada mediante el colorímetro DR900 (Figura 22).



Figura 19. Resultado obtenido de DQO del lactosuero diluido x10 (140 NTU).

De acuerdo a los cálculos, el valor de DQO del lactosuero a 140 NTU fue de 5000mg/L, ya que, para realizar los cálculos se tomó en cuenta la dilución 1:100. El cálculo se puede encontrar en Anexo 5 (Cálculo realizado para determinar el valor inicial de DQO a 140 NTU), producto del empleo de la ecuación 8.

Considerando que el efluente se diluyó en total con una proporción 1:1000, debido a la primera dilución 1:10 realizada antes del tratamiento y posteriormente la segunda dilución 1:100 realizada después del tratamiento, pudo conocerse que el efluente desgrasado estaría presentando 50000mg/L de DQO en la etapa de caracterización inicial. Esto es debido a la alta carga orgánica que posee, ya que se ha reportado efluentes de lactosuero provenientes de la

elaboración del queso (como en este caso) que llegan a contener hasta 90000mg/L de DQO en algunos casos, tal como reportan los autores Raghunath et al. (2016) ¹⁶⁹. Los autores Prazeres et al. (2013) ¹⁷⁰ atribuyen esta alta carga orgánica principalmente al contenido de lactosa, proteína y grasa, además de comentar que esta variación generada en la medición de los parámetros de calidad del agua depende del producto final, tipo de sistema, métodos de operación, gestión de las aguas residuales generadas, clima y proceso de lavado empleado.

3.4.2.2. Estrategias experimentales

Para este diseño experimental de Taguchi se evaluó el efecto de las variables independientes o factores, los cuales fueron pH, temperatura y relación Q/M, con respecto a la variable dependiente. Se ha considerado 'más grande es mejor' como criterio de optimización del diseño experimental, ya que lo que se busca es maximizar la remoción de turbidez en el proceso. Cada uno de los factores contó con 3 niveles, lo cual dio un total de 9 ensayos, sin embargo, al considerar hacer pruebas por triplicado con la finalidad de corroborar la reproducibilidad de los experimentos en cuanto a la remoción de la turbidez inicial se realizaron 27 ensayos. Concluido el tiempo de sedimentación se pasó a medir nuevamente los parámetros de calidad del agua considerados (pH, turbidez, TDS y conductividad eléctrica). Los valores de TDS y conductividad se registraron una sola vez, mientras que se realizó lectura por duplicado en cuanto a la turbidez. Al terminar de registrar los resultados de los 27 experimentos realizados, los cuales se pueden visualizar en el Anexo 3, Tabla 20, se procedió a calcular el promedio las lecturas 1 y 2 de la turbidez final de manera individual, por cada triplicado. En todo el Anexo 2 se puede visualizar a las imágenes que corresponden a los resultados obtenidos en los ensayos realizados por triplicado.

Al realizar los cálculos de promedio correspondientes, se obtiene los siguientes valores reflejados en la Tabla 18.

Tabla 18. Promedios de turbidez y de los porcentajes de remoción obtenidos en los ensayos realizados por triplicado.

N°	Quitosano/Mucílago	Temperatura (°C)	pH	Turbidez ₁ (NTU)	Turbidez ₂ (NTU)	Promedio de Turbidez (NTU)	Remoción de Turbidez ₁	Remoción de Turbidez ₂	Promedio de Remoción de Turbidez
1	0.25	25	3.5	60.00	60.00	60.00	57.14%	57.14%	57.14%
2	0.25	50	6	9.58	9.64	9.61	93.15%	93.11%	93.13%
3	0.25	75	8.5	94.00	94.00	94.00	32.86%	32.86%	32.86%
4	0.5	25	6	23.85	23.94	23.90	82.96%	82.90%	82.93%
5	0.5	50	8.5	95.00	95.00	95.00	32.14%	32.14%	32.14%
6	0.5	75	3.5	36.57	36.50	36.54	73.88%	73.93%	73.91%
7	0.75	25	8.5	94.67	94.67	94.67	32.38%	32.38%	32.38%
8	0.75	50	3.5	18.02	18.10	18.06	87.13%	87.07%	87.10%
9	0.75	75	6	3.93	4.02	3.97	97.20%	97.13%	97.17%

Tal como se puede apreciar en la Tabla 18, se ha calculado el porcentaje de remoción empleando el valor de turbidez final promediada, considerando como 100% de turbidez o turbidez inicial al valor de 140 NTU.

Se puede visualizar claramente que el ensayo N°9, el cual estaba a condiciones de 75°C, pH 6 y relación Q/M de 0.75 pudo remover el 97.17% de la turbidez, siendo el ensayo con mayor remoción de todo el diseño experimental. Por otro lado, el ensayo N°2 al emplear una relación Q/M de 0.25, 50°C y pH 6, pudo remover el 93.13%. El ensayo N°8 pudo remover el 87.10% a condiciones de pH 3.5, 50°C y relación Q/M de 0.75. El ensayo N°4 obtuvo 82.93% de remoción de turbidez, el cual fue realizado a condiciones de pH 6, 25°C y relación Q/M de 0.5. En cuanto al ensayo N°6 nos muestra que se logró remover un 73.91% de la turbidez, el cual fue realizado a pH 3.5, 75°C y relación Q/M de 0.5. Después tenemos al ensayo N°1, el cual proporcionó un 57.14% de remoción de turbidez a pH de 3.5, 25°C y relación Q/M de 0.25. El ensayo N°3 pudo remover el 32.86% de la turbidez inicial con parámetros de pH 8.5, 75°C y 0.25 en relación Q/M; el ensayo N°7 logró remover el 32.38% de la turbidez, el cual se realizó a pH 8.5, 25°C y 0.75 en cuanto a relación Q/M. Finalmente, el ensayo N°5 brindó el porcentaje de remoción más

bajo de entre todos los experimentos de este diseño experimental, el cual se realizó a condiciones de 32.14%, a pH 8.5, 50°C y relación Q/M de 0.5.

A continuación, se muestra un gráfico de barras, el cual ilustra el comportamiento de la variable de respuesta en función de las variables independientes, tomando en cuenta los parámetros considerados para cada corrida o ensayo.

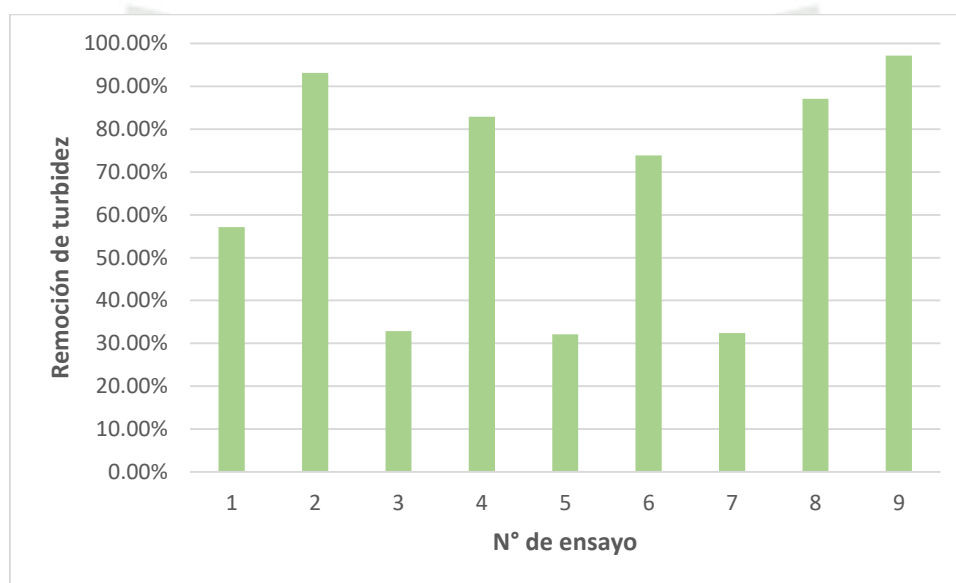


Figura 20. Gráfico de barras: remoción de turbidez obtenida en cada ensayo.

Se puede observar experimentos que muestran una alta eficiencia, los cuales curiosamente involucran pH 3.5 y 6: los ensayos N° 2, 4 y 9 que involucran pH 6 logran remover mínimo un 82% la turbidez, mientras solo dos ensayos que involucran pH 3.5 logran una remoción mínima del 73% (ensayos N° 6 y 8), a diferencia del restante que solo logra remover el 57.14% (ensayo N° 1). El gráfico de barras también permite identificar ensayos donde es evidente una disminución de la eficiencia del proceso; por ejemplo, se puede observar que, sin importar las condiciones de Q/M y temperatura, los ensayos que involucran al pH 8.5 presentan bajas remociones de turbidez (ensayos N° 3, 5 y 7), evidenciando una baja eficiencia en el tratamiento al solo remover la turbidez en el rango de 32.14-32.86% en general. Esto evidencia cómo la eficiencia del tratamiento logra promoverse al tener en consideración ciertas condiciones,

pudiendo maximizar la remoción de turbidez en el ensayo más óptimo (ensayo N°9), el cual empleó las condiciones de relación Q/M 0.75, 75°C y pH 6.

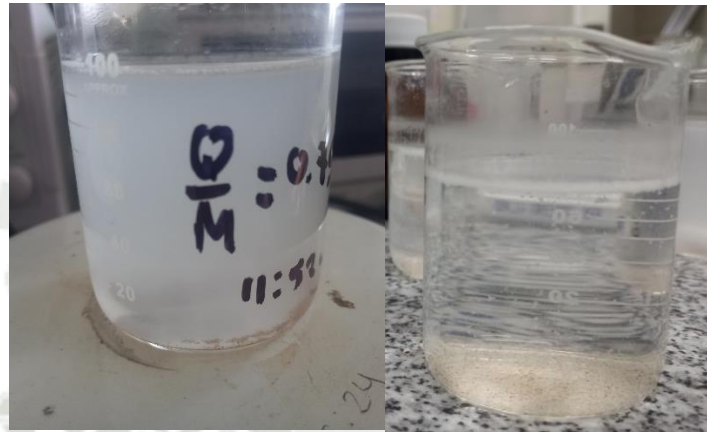


Figura 21. Comparativa entre efluente sin tratar y el resultado óptimo (ensayo N°9).

Después del proceso de coagulación y floculación en el ensayo N°9, el cual consideró relación Q/M de 0.75, 75°C y pH 6, se pudo remover un total de 97.17% a la muestra preparada, la cual tenía inicialmente 140 NTU, terminando con una turbidez final de 3.94 NTU. El proceso de coagulación se da a cabo cuando los coloides que se encuentra suspendidos en el efluente logran ser desestabilizados con el uso de agentes coagulantes, mientras que en la floculación, siendo el paso que le sigue, se encarga de que las partículas desestabilizadas se agreguen entre sí para promover la formación de flóculos de mayor tamaño, con el propósito de removerlos al promover así su sedimentación rápida ¹⁴⁷. Teniendo en consideración las características de cada agente coagulante de manera individual, la eficiencia de todo el proceso dependió también de otros factores: la dosis del coagulante, agitación en coagulación y floculación y velocidad de agitación en coagulación y floculación fueron las variables fijas, mientras que el pH, temperatura y relación Q/M fueron las variables independientes; por otro lado, también influye la fuerza iónica, la naturaleza y concentración de materia orgánica en el efluente, además del tamaño y distribución de las partículas coloidales, entre otros ¹⁷¹. Con respecto al pH, este impacta en la eficiencia del proceso de coagulación y floculación para remover la turbidez presente en el efluente al condicionar el comportamiento o carga iónica que adquiera el

biocoagulante en el proceso, además de la naturaleza del agua residual con respecto a la carga iónica que presente el sistema coloidal. Se ha reportado que el mucílago adquiere mayor carga aniónica a medida que el pH aumenta ¹⁷², mientras que el quitosano presenta una carga ligeramente catiónica en medio ácido, debido a que su protonación es mayor a medida que disminuye el pH. Por otro lado, se ha explicado el comportamiento de los grupos ionizables presentes en los componentes del lactosuero ácido en función del pH; las proteínas, las cuales tienen un punto isoeléctrico (pI) menor a pH 5,5 ⁵⁷, adquieren una carga predominantemente negativa en su superficie cuando el pH del medio está por encima del pI ¹⁷³; Con respecto al ácido láctico, su comportamiento en el medio también depende del pH, el cual está relacionado con el lactato el cual tiene un pKa de 3.86. A pH 6 el ácido láctico está disociado un 99.28%, encontrándose en su forma de lactato ¹⁷⁴.

Habiendo comprendido la influencia que tiene el pH tanto en la fuerza iónica de los biocoagulantes elaborados como en el efluente, con respecto a los coagulantes se puede comentar que el mecanismo de neutralización de carga se da principalmente por la atracción electrostática entre el quitosano y las partículas coloidales, ya que, el efluente a este pH debe de tener predominantemente carga negativa y, por parte del quitosano, sus grupos amino se protonan en medio ácido, volviéndose un polímero catiónico. A pesar de tener una ligera protonación, cuando el grupo amina primario se protona adquiere una carga iónica con tres unidades positivas, lo cual aporta a la fuerza iónica directamente debido a la densidad catiónica brindada; considerando que los grados de desacetilación obtenidos son de alrededor del 80%, esto puede influir ya que hay mayor cantidad de grupos amina primarios disponibles para ser protonados. La autora Geetha Devi et al. (2013) ¹⁶³ ha empleado quitosano en su tratamiento de efluente lácteo por proceso de coagulación y floculación, comentando lo descrito con respecto al mecanismo de neutralización, además de sugerir un mecanismo de puente, atrapando partículas coloidales en su superficie, lo cual puede deberse a la presencia de grupos hidroxilo. Con respecto a la floculación, la adsorción de puente de hidrógeno es el principal mecanismo por el cual el quitosano aglomera las partículas coloidales, ya que sus grupos hidroxilo generan puentes de hidrógeno, tal como se comentó, sin embargo, la autora mencionada sugiere que la floculación hidrófoba también favorece este proceso. Por parte del mucílago, si bien es un coagulante predominantemente aniónico a este pH y debido a ello, en teoría no debería aportar directamente en la neutralización de carga, se conoce que su extracto contiene trazas de Ca^{2+} y

Mg^{2+} , los cuales podrían neutralizar cierta cantidad de partículas coloidales negativas, además de generar un mecanismo de adsorción por medio de la formación de puentes, tal como comenta la autora Otálora et al. (2022)⁷⁹. De cierto modo eso puede contribuir a la floculación parcialmente, sin embargo, similar al caso del quitosano, el mucílago de nopal también posee grupos hidroxilo los cuales emplean su hidrógeno para unir a su estructura a partículas cargadas negativamente mediante un enlace no iónico como el que se encuentra presente en el puente de hidrógeno.

Si bien el quitosano como el mucílago pueden tener un efecto sinérgico tanto en la coagulación como la floculación, la temperatura puede estar jugando un papel clave, inclusive en el comportamiento de las biomoléculas que componen el efluente. Con respecto a la influencia de la temperatura en el comportamiento de los componentes del lactosuero ácido, el autor Chandrapala et al. (2015)¹⁷⁴ monitoreó el efecto del pH y temperatura en componentes de lactosuero ácido con un equipo de medición de potencial Zeta, encontrando que la temperatura no afecta significativamente el comportamiento de sus grupos ionizables, a diferencia del pH, tal como se comentó anteriormente. El mismo autor comenta que a medida que aumenta la temperatura, permanece el ácido láctico sin desprotonarse a lactato, reportando específicamente una reducción de ácido láctico del 42% a 15°C, mientras que solamente 14% se redujo al llegar a 90°C. Por parte del mucílago de nopal, según Luna-Sosa et al. (2022)¹¹² a partir de una temperatura igual o mayor de 90°C los polisacáridos presentes comienzan a degradarse; si bien la temperatura de trabajo fue menor a la recomendada, puede que aun así parte de la estructura pueda verse afectada por encontrarse a una temperatura relativamente cercana. De ser el caso, tal vez no afectaría directamente la neutralización de carga en la coagulación debido a que posee la misma carga que el efluente, además de que la atracción electrostática se da principalmente por especies inorgánicas como los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} que no son tan susceptibles a altas temperaturas como los polisacáridos presentes, sin embargo, puede afectar el proceso de floculación debido a una posible modificación de su estructura y, a consecuencia de ello, cambio en su peso molecular al exponerse a tal temperatura. Con respecto al quitosano, si bien se ha reportado que la solubilidad del quitosano no se ve afectada entre temperaturas de 25-50°C¹⁷⁵, se conoce que el aumento de temperatura en un proceso de coagulación y floculación aumenta la velocidad de las moléculas, y a consecuencia de ello, logra aumentar la energía cinética. Además, se menciona que el incremento de temperatura en el tratamiento aumenta las reacciones

químicas, disminuyendo el tiempo de formación de flóculos e inclusive la viscosidad del agua ⁷³. Esto puede ser totalmente correcto, debido a que en el ensayo 9 se pudo visualizar una formación de flóculos inmediatamente después de agregar el biocoagulante, los cuales pudieron sedimentar por completo en cuestión de minutos, a comparación de los demás ensayos. Según el autor Alehosseini et al. (2022) ¹⁷⁶ se realizó un estudio de estabilidad térmica con respecto al quitosano y, se encontró que a una temperatura entre 150-600°C se evidencian cambios en la estructura en la cadena polimérica, debido a una posible descomposición y degradación. Teniendo en consideración la influencia de la temperatura y el aporte del quitosano a la fuerza iónica para desestabilizar partículas coloidales, podría decirse que la temperatura promueve la eficiencia de descontaminación en un tratamiento de efluentes por coagulación y floculación, debido a la influencia de esta en la reacción dada en el proceso de coagulación, impactando también en la floculación mediante la formación rápida de flóculos dependiendo esto de la estabilidad térmica del quitosano; también los cationes, dependiendo de su estabilidad térmica, podrían anclarse a los grupos -OH del quitosano para la formación de puentes, favoreciendo de este modo la neutralización de carga y floculación.

3.4.2.3. Determinación de DQO al resultado óptimo del diseño experimental de Taguchi

La prueba de DQO se le realizó únicamente al resultado óptimo del diseño experimental mencionado, el cual en esta ocasión fue el ensayo N°9, brindando una remoción de turbidez del 97.17%, la cual fue obtenida evaluando la influencia de los factores 75°C, pH 6 y relación Q/M de 0.75.

Finalizado el tiempo de digestión de la muestra, el vial de DQO se dejó enfriar y al realizar la lectura, nos brindó un valor de DQO de 37mg/L.



Figura 22. Resultado de DQO obtenido del ensayo óptimo en cuanto a turbidez.

El valor real de DQO presente en la muestra tratada fue de 3700mg/L, el cual se obtuvo tras multiplicar el factor x100 considerado al diluir la muestra en una proporción 1:100 (ecuación 8). Este valor indica que se logró remover el 26% de DQO total, ya que, el valor de DQO base a 140 NTU es de 5000mg/L. El cálculo se encuentra en Anexo 5 (Cálculo realizado para determinar el valor de DQO del ensayo óptimo luego del proceso de biocoagulación).

El DQO es un parámetro de calidad del agua, representando el grado de contaminación orgánica en cuerpos de agua ¹⁷⁷. Su definición técnica consiste en la cantidad necesitada de oxígeno para poder oxidar la materia orgánica por medio de un oxidante químico, usualmente (así como en el presente trabajo) dicromato de potasio ¹⁷⁸. El DQO puede estar dividido en dos fracciones diferenciadas, las cuales vienen a ser la DQO soluble y el DQO particulado o insoluble, siendo el primero de fácil degradación, mientras que el segundo es de lenta biodegradación. El DQO soluble se determina sobre el agua residual, posterior a un filtrado de 0.45 μ m, la cual puede estar formada por fracciones adicionales, las cuales pueden ser biodegradables, no biodegradables y lentamente biodegradables ¹⁷⁹. Teniendo en consideración lo relacionado al DQO y sus tipos y, también teniendo en cuenta que el resultado óptimo logró remover el 97.17% de la turbidez, podríamos decir el 26% del DQO removido en el presente trabajo incluye mayoritariamente al DQO particulado o insoluble. Cabe la posibilidad de que una ligera remoción del DQO soluble pueda llevarse a cabo, sin embargo, no cabe la duda que el 74% de DQO total remanente corresponde a esa fracción mencionada. Se ha podido evidenciar biocoagulantes con resultados similares en cuanto a remoción de DQO, como por ejemplo en el

caso de Chuiza-Rojas et al. (2019) ¹⁶¹ que pudo remover el 76.90% de turbidez de un efluente lácteo con mucílago de nopal, mientras que la DQO removida fue de 26.80%, considerando una dosis de 400ppm; por otro lado, el autor Dkhissi et al. (2023) ¹⁵⁴ al emplear el mismo coagulante en un efluente procedente de la refinación de aceite vegetal logra remover 99% de turbidez y el 76% de DQO al emplear 40ppm, sugiriendo que el 24% de DQO remanente podría atribuírsele al DQO soluble. Con respecto al quitosano se ha reportado remociones relativamente altas en efluentes lácteos, como los autores Geetha Devi et al. ¹⁶³ y Chi y Cheng (2006) ¹⁶⁴ que reportan remociones de DQO de 79% y 70% al emplear dosis de 100 y 25ppm respectivamente. Esto evidencia la implicancia que conlleva escoger una dosis para el tratamiento, además de sugerir el efecto que tiene la naturaleza del efluente en el proceso de disminuir los valores de DQO. Si bien la dosis fue una variable fija en el presente trabajo, las diferentes proporciones podrían aportar en parte diversa carga orgánica en el efluente; la autora Choudhary et al. (2019) ⁸⁸ comenta que a pesar de que los biocoagulantes puedan remover la turbidez presente mediante la desestabilización del sistema coloidal, puede darse la desventaja de incrementar la carga orgánica debido a la naturaleza de este tipo de coagulantes, sugiriendo que la dosis del coagulante debe de ser administrada sin sobredosificar, para evitar en parte el crecimiento microbiano. Al emplear 10ppm para tratar por coagulación y floculación un efluente con turbidez inicial baja y media pudo remover 88% y 95% de turbidez respectivamente, presentando en ambos casos un aumento de 1% en DQO, mientras que al emplear un efluente con turbidez alta y 80ppm de dosis de biocoagulante obtuvo una remoción de 98% en cuanto a turbidez, sin embargo, el DQO aumentó un 91%.

3.4.2.4. Tratamiento estadístico

Para el tratamiento estadístico se empleó el software Minitab, con la finalidad de analizar el diseño experimental de Taguchi y posterior a ello un análisis de regresión.

a) Diseño experimental de Taguchi: Análisis de modelo lineal (relaciones S/R vs. variables independientes)

Al culminar con la experimentación se introdujo como respuesta del diseño experimental el promedio de las remociones de turbidez en cada corrida correspondiente. En la Tabla 21 (Anexo 3) se puede observar que el ensayo N°9 presenta una relación S/R con un valor más alto de entre todos los ensayos, el cual es de -0.24936. Esto indica que es el ensayo con la mejor combinación de factores para maximizar la remoción de turbidez.

A continuación, se presentan las tablas de salidas generadas por el software Minitab, las cuales presentan los resultados obtenidos al analizar el diseño de Taguchi, denominado de manera general como ‘‘Análisis de modelo lineal: Relaciones S/R vs factores’’; el análisis de modelo lineal de las relaciones S/R tiene como función maximizar la relación la señal (media) y el ruido (desviación estándar). Las tablas de salidas generadas por el software Minitab consisten en las de coeficientes de modelos estimados, las cuales brindan información sobre el valor T y el valor P; ANOVA y tabla de respuesta; adicionalmente se incluye la gráfica de efectos principales. Se está considerando el criterio de optimización ‘más grande es mejor’ con respecto a la relación S/R.

La Tabla 22 (Anexo 3) nos muestra información sobre los coeficientes de modelos estimados para relaciones S/R. Entre todos los parámetros reflejados, solo los dos niveles de mayor relevancia para el pH presentan un valor P menor a 0.05, el cual es 0.009 para pH 6 y 0.045 para pH 3.5. Esto indica que, dentro de parámetros considerados en la tabla de coeficientes de modelos estimados para relaciones S/R, solamente los parámetros pH 3.5 y pH 6.0 tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción de turbidez. Se puede observar que mientras más grande sea el valor del coeficiente en términos absolutos, más grande es el valor P obtenido.

La Tabla 23 (Anexo 3) nos brinda información del Análisis de Varianza sobre la influencia de las variables independientes en la relación S/R. Se puede observar que el pH es la única variable que logra un valor P menor a 0.05, el cual es igual 0.009. Esto quiere decir que solamente el factor pH tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la relación S/R con un nivel de confianza del 95%.

La Tabla 24 (Anexo 3) nos muestra la tabla de respuesta para relaciones S/R, indicando el orden de los factores de acuerdo a su relevancia en el diseño experimental, basándose en el valor de delta, tomando en cuenta que para este resultado se consideró que es mejor mientras más grande es la relación señal-ruido. El valor delta está calculando restándole el valor mínimo al valor máximo de entre los tres niveles de cada factor. El factor de pH es el de mayor relevancia de entre los tres, seguido de la temperatura y finalmente la relación Q/M.

La Figura 61 (Anexo 4) es la gráfica de efectos principales. Esta gráfica muestra la media de las relaciones S/R de todos los parámetros considerados en la experimentación; también se puede observar la presencia de una línea base horizontal a la mitad de la gráfica, la cual representa la media general de las relaciones S/R obtenidas en cada ensayo, siendo este valor de -4.5. Los niveles que presentan un valor de relación S/R superior a esa media general son los que contribuyen notablemente en mejorar la respuesta del sistema. Estos niveles en conjunto forman distintas combinaciones de las que se espera un alto rendimiento en la remoción de la turbidez, incluso contemplando la posibilidad de generar un resultado optimizado.

Estos últimos experimentos a realizar forman parte de la última etapa del método de Taguchi, la cual consiste en realizar pruebas confirmatorias con los niveles óptimos seleccionados^{59,180}. De acuerdo a la Figura 61, esos niveles serían la relación Q/M 0.75, 50°C, 75°C, pH 3.5 y pH 6.0, presentando valores de relación S/R de -3.7478, -3.8923, -4.1807, -2.8956 y -0.8311 respectivamente. Considerando la interpretación de la Figura 61 se formuló a las pruebas confirmatorias, las cuales fueron en total cuatro, sugiriendo emplear pH 3.5 y 6 a 50°C y 75°C a una relación Q/M constante de 0.75. De estas pruebas confirmatorias, ya se tenía el resultado de dos ensayos porque coincidentemente fueron parte del diseño experimental. Con respecto a los otros dos ensayos solamente se realizó uno, el cual involucraba a todos los niveles óptimos en su configuración: relación Q/M 0.75, 50°C y pH 6. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 19. Resultados de combinaciones sugeridas por la gráfica de efectos principales.

N° de ensayo	Configuración			Remoción de turbidez
	Q/M	Temperatura (°C)	pH	
1	0.75	50	3.5	87.10%
2	0.75	75	6	97.17%
3	0.75	50	6	95.98%

Tal como se mencionó, hubo ensayos de los cuales ya se tenían resultados porque pertenecían al diseño experimental, siendo estos experimentos el N°1 y N°2 de la Tabla 19: la configuración relación Q/M 0.75, 50°C y pH 3.5 removió 87.10% de turbidez, mientras que el ensayo que consideró una relación Q/M 0.75, 50°C y pH 6 logró remover 97.17% de turbidez. En cuanto al tercer ensayo, tal como se comentó, tiene a los niveles óptimos como parte de sus condiciones de operación; ha sido capaz de remover la turbidez del efluente significativamente, siendo este valor de remoción del 95.98%, considerando una configuración de relación Q/M 0.75, 50°C y pH 6. Es importante tener en cuenta que este último ensayo estuvo muy cerca de superar al resultado óptimo, el cual en la Tabla 19 fue proporcionado por el ensayo N°2 y reflejó una remoción de turbidez del 97.17%.

De acuerdo al análisis estadístico, se pudo saber que el pH era el único factor con un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción de turbidez. También se pudo conocer que únicamente pH 3.5 y pH 6 tenían un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción de turbidez, según la tabla de los coeficientes estimados (Tabla 22); el pH 6 presentó mayor significancia estadística, reflejado en su valor P de 0.009. Toda esta información se complementa con las pruebas confirmatorias, las cuales, así como evidencian una alta eficiencia en general, también muestran una mayor eficiencia al involucrar al pH 6 en los ensayos, obteniendo un mínimo de 95.98% de remoción de turbidez al emplear una relación Q/M constante de 0.75 y variando la temperatura entre 50°C y 75°C.

Esta última etapa del método de Taguchi permite verificar que las combinaciones sugeridas por la gráfica de efectos principales realmente presenten un efecto altamente positivo sobre la respuesta, óptimos o casi óptimos¹⁸¹. Se pudo remover como mínimo un 87.10% empleando los niveles que mostraron una relación S/R superior a la media general, evidenciando la

optimización robusta de parámetros de proceso que puede realizar este diseño experimental. Con respecto al ensayo N°3, el cual tenía una configuración constituida por los niveles más óptimos, pudo remover un 95.98% de la turbidez, siendo muy cercano al resultado óptimo del diseño experimental (ensayo N°2 en la Tabla 19), el cual removió 97.17%. Si bien no se logró generar un resultado optimizado, se pudo obtener distintas configuraciones robustas que mostraron un alto rendimiento al remover la turbidez del efluente, siendo el caso del ensayo N°3 el cual presentó a los niveles más óptimos en su configuración y removió 95.98% de turbidez. En la gráfica de efectos principales, cada factor presentó un nivel con el más alto valor de relación S/R, siendo estos los niveles más óptimos y de mayor influencia sobre la respuesta, tal como se evidenció el ensayo N°3 en los resultados de las pruebas confirmatorias.

El método de Taguchi tiene la capacidad de optimizar el rendimiento de un sistema mediante distintas combinaciones de parámetros involucrados en el proceso ¹⁸⁰. Las pruebas confirmatorias permitieron validar dicho método, ya que, en la última etapa se demostró que todas las combinaciones posibles sugeridas generaron resultados muy eficientes en el proceso de remoción de turbidez por un proceso de coagulación y floculación, inclusive algunos cercanos al óptimo del diseño experimental original. Si bien este diseño experimental ha servido para la evaluar el comportamiento del biocoagulante compuesto por mucílago de nopal y quitosano en la remoción de turbidez, también ha permitido identificar los niveles de factores que tienen el potencial de mejorar la respuesta en determinados contextos experimentales, inclusive al ensayo con los niveles óptimos que logró una remoción cercana al óptimo del diseño experimental.

CONCLUSIONES

- Se ha demostrado la extracción satisfactoria del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) mediante el método referenciado que emplea etanol al 95%. Posterior a la extracción se obtuvo un rendimiento final del 0.69%. Se detalló la síntesis del quitosano por medio del método de desacetilación alcalina, empleando como material principal a la quitina, consiguiendo un rendimiento final del 56.22%, partiendo de 15.0017g de quitina
- Fue posible caracterizar el mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano mediante FTIR, identificando las bandas características a los grupos funcionales responsables del proceso de coagulación y floculación cuando se emplea este tipo de coagulantes, de acuerdo a la literatura. Con respecto al quitosano, se obtuvo un producto con alto grado de desacetilación, siendo este valor de 80.93%, ubicado dentro del rango aceptable que requiere un grado de desacetilación similar al obtenido experimentalmente para denominar ‘quitosano’ al producto de síntesis.
- Fue posible interpretar las biopelículas compuestas por mucílago extraído de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano, las cuales consistieron en formulaciones de 75% Quitosano-25% Mucílago (relación Q/M; 0.75), 50% Quitosano-50% Mucílago (relación Q/M; 0.5) y 25% Quitosano-75% Mucílago (relación Q/M; 0.25). Posterior a su elaboración se secaron a 40°C en la estufa hasta obtener un polvo fino, el cual se empleó para los ensayos de biocoagulación.
- Se evaluó la eficiencia del biocoagulante compuesto por mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y quitosano a diferentes proporciones como pretratamiento alternativo de un efluente lácteo. Se pudo remover el 97.17% de la turbidez y 26% de DQO en el ensayo óptimo, el cual se realizó a condiciones de relación Q/M de 0.75, pH 6 y 75°C. Con respecto al análisis estadístico del efecto de la dosis de biocoagulante compuesto por mucílago de nopal y quitosano sobre el porcentaje de remoción de turbidez se aceptó la hipótesis nula, ya que el biocoagulante compuesto mucílago de nopal y quitosano no presentó efecto estadísticamente significativo en la remoción de turbidez del efluente lácteo tratado. Se encontró que, de todas las variables independientes, únicamente el pH presentó diferencia estadísticamente significativa, siendo su valor P de 0.009 en el análisis de relaciones S/R vs. factores.

RECOMENDACIONES

- Con respecto al mucílago de nopal, se recomienda optar por métodos que permitan identificar y cuantificar a todos los compuestos presentes, tales como proteínas, lípidos, minerales y demás compuestos bioactivos, como polifenoles y flavonoides. Además, se recomienda optar por análisis instrumentales como Espectroscopia de Absorción Atómica, ICP- OES, Cromatografía Iónica, e inclusive técnicas analíticas tradicionales como Titulación por Complexometría, con la finalidad de identificar y cuantificar iones presentes en el mucílago, como el Ca^{2+} y Mg^{2+} , estableciendo así la significancia que puedan presentar en un tratamiento empleando coagulación y floculación, además de estimar la fuerza iónica total proporcionada por ese biocoagulante.
- Con respecto al quitosano, se recomienda probar otra combinación de parámetros con en caso de que se busque aumentar los grados de desacetilación presentes en la estructura polimérica, además de caracterizarlo más a profundidad para poder conocer su peso molecular y solubilidad, por ejemplo.
- Se recomienda el empleo de equipos, como el medidor de potencial zeta, con tal de conocer la fuerza iónica predominante, tanto en los coagulantes naturales en seco como en la formulación a diferentes proporciones, además del efluente. Por otro lado, se recomienda también realizar un análisis individual, como análisis de proteínas, lípidos y carbohidratos, con tal de identificar toda la gama de compuestos orgánicos presentes en el efluente de lactosuero ácido.
- Es recomendable también realizar un análisis topográfico con técnicas como Microscopía Electrónica de Barrido (conocido también por sus siglas en inglés como SEM), con el propósito de conocer los cambios morfológicos que puede haber al elaborar el biocoagulante compuesto de quitosano y mucílago, de modo que esto pueda contribuir en el análisis de los mecanismos de coagulación y floculación involucrados.
- Con respecto al DQO, es recomendable emplear un diseño experimental que permita evaluar su comportamiento a profundidad en distintos contextos experimentales, además de realizar un análisis estadístico que demuestre la significancia estadística que pueda tener cada factor sobre esa variable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kjellstrom T, Lodh M, McMichael T, Ranmuthugala G, Shrestha R, Kingsland S. Air and Water Pollution: Burden and Strategies for Control. En: Jamison DT, Breman JG, Measham AR, Alleyne G, Claeson M, Evans DB, et al., editores. Disease Control Priorities in Developing Countries [Internet]. 2nd ed. Washington (DC): The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank; 2006 [citado 29 de diciembre de 2022]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11769/>
2. Prieto García F, Callejas Hernández J, Reyes Cruz VE, Marmolejo Santillán Y. Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual. Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales [Internet]. 2012 [citado 13 de enero de 2023];5(3):51-77. Disponible en: <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-aidis-de-ingenieria-y-ciencias-ambientales/articulo/electrocoagulacion-una-alternativa-para-depuracion-de-lactosuero-residual>
3. Skrzypiec K, Gajewska MH. The use of constructed wetlands for the treatment of industrial wastewater. Journal of Water and Land Development [Internet]. 2017;34:233-40. Disponible en: <https://bibliotekanauki.pl/articles/292531>
4. Quille LQ, Vilca OML, Ordoñez FPA. Potencialidades del lactosuero generado por la industria quesera y su valorización. Revista científica I+D aswan science [Internet]. 23 de diciembre de 2021 [citado 14 de enero de 2023];1(2):16-24. Disponible en: <https://www.revistascience.enterprisesadeg.org.pe/index.php/sciencie/article/view/10>
5. Das PP, Sharma M, Purkait MK. Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. Separation and Purification Technology [Internet]. 1 de julio de 2022 [citado 19 de enero de 2023];292:121058. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586622006153>
6. Von Sperling M. Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal [Internet]. 2007 [citado 19 de enero de 2023]. Disponible en:

<https://iwaponline.com/ebooks/book/72/Wastewater-Characteristics-Treatment-and-Disposal>

7. Valencia Denicia, E., Ramírez Castillo, M. La industria de la leche y la contaminación del agua. Elementos: Ciencia y cultura [Internet]. 2009 [citado 19 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/294/29411996004.pdf>
8. Bhardwaj A, Rajput R, Misra K. Chapter 9 - Status of Arsenic Remediation in India. En: Ahuja S, editor. Advances in Water Purification Techniques [Internet]. Elsevier; 2019 [citado 19 de enero de 2023]. p. 219-58. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128147900000090>
9. Bhandari VM, Ranade VV. Chapter 2 - Advanced Physico-chemical Methods of Treatment for Industrial Wastewaters. En: Ranade VV, Bhandari VM, editores. Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse [Internet]. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2014 [citado 20 de enero de 2023]. p. 81-140. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080999685000027>
10. Espinoza-Cisternas C, Salazar R. Chapter 15 - Application of Electrochemical Processes for Treating Effluents From Landfill Leachate as Well as the Agro and Food Industries. En: Martínez-Huitle CA, Rodrigo MA, Scialdone O, editores. Electrochemical Water and Wastewater Treatment [Internet]. Butterworth-Heinemann; 2018 [citado 2 de enero de 2023]. p. 393-419. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128131602000158>
11. López P, Harnisth A. Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. Enfoque UTE [Internet]. 2016 [citado 20 de enero de 2023];7(1):13-21. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5722/572261583002/html/>
12. Rebah FB, Siddeeg SM. Cactus an eco-friendly material for wastewater treatment: A review. Journal of Materials and Environmental Science. 2017;8(5):1770-82.
13. Latha A, Ganesan R, B K, S T. Comparative Study of Organic Coagulants in Water Treatment. ECS Trans [Internet]. 24 de abril de 2022 [citado 3 de enero de 2023].

- 2023];107(1):7997. Disponible en:
<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/10701.7997ecst/meta>
14. Nath A, Mishra A, Pande PP. A review natural polymeric coagulants in wastewater treatment. *Materials Today: Proceedings* [Internet]. 1 de enero de 2021 [citado 3 de enero de 2023];46:6113-7. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320323324>
15. Kumar U, Nahar K, Thakur AS. Sustainable Treatment of Water and Wastewater using Natural Plant-based Coagulants: A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology* [Internet]. 8 de junio de 2022 [citado 3 de enero de 2023];11(5). Disponible en: <https://www.ijert.org/research/sustainable-treatment-of-water-and-wastewater-using-natural-plant-based-coagulants-a-review-IJERTV11IS050170.pdf>, <https://www.ijert.org/sustainable-treatment-of-water-and-wastewater-using-natural-plant-based-coagulants-a-review>
16. Food and Agriculture Organization. Dairy Market Review – Emerging trends and outlook 2022. Disponible en:
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/216a61b1-e819-4fde-bd5f-1ad220dc2db7/content>
17. US EPA O. Dairy Products Processing Effluent Guidelines [Internet]. 2018 [citado 18 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.epa.gov/eg/dairy-products-processing-effluent-guidelines>
18. LIFE 3.0 - LIFE Project Public Page [Internet]. [citado 18 de enero de 2023]. Disponible en:
https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=6210
19. Slavov AK. General Characteristics and Treatment Possibilities of ^[11]_[SEP] Dairy Wastewater – A Review. *Food Technol Biotechnol* [Internet]. marzo de 2017 [citado 14 de enero de 2023];55(1):14-28. Disponible en:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5434364/>

20. INDECOPI. Informe de lanzamiento del estudio de mercado sobre el sector lácteo en el Perú [Internet]. octubre de 2021 [citado 14 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.indecopi.gob.pe/documents/51771/6194832/Informe+Lanzamiento+Leche/4e4de918-4f25-ad5f-e014-80e13be3b682>
21. Agraria. Producción nacional de queso alcanzó las 126.685 toneladas en 2021, mostrando un aumento de 9.1% [Internet]. marzo de 2022. [citado 18 de enero de 2023]. Disponible en: <https://agraria.pe/noticias/produccion-nacional-de-queso-alcanzo-las-126-685-toneladas-e-27412>
22. Kumari S, Kishor R. Chapter 1 - Chitin and chitosan: origin, properties, and applications. En: Gopi S, Thomas S, Pius A, editores. Handbook of Chitin and Chitosan [Internet]. Elsevier; 2020 [citado 20 de enero de 2023]. p. 1-33. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128179703000018>
23. Guerra R. WATER ANALYSIS | Industrial Effluents. En: Worsfold P, Townshend A, Poole C, editores. Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition) [Internet]. Oxford: Elsevier; 2005 [citado 20 de enero de 2023]. p. 289-99. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0123693977001114>
24. Thomas O, Thomas MF. Chapter 12 - Industrial wastewater. En: Thomas O, Burgess C, editores. UV-Visible Spectrophotometry of Waters and Soils (Third Edition) [Internet]. Elsevier; 2022 [citado 2 de julio de 2023]. p. 385-416. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323909945000137>
25. Cisneros BJ. 4.06 - Safe Sanitation in Low Economic Development Areas. En: Wilderer P, editor. Treatise on Water Science [Internet]. Oxford: Elsevier; 2011 [citado 29 de diciembre de 2022]. p. 147-200. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444531995000828>
26. Mahmood Q, Khan AF, Khan A. Chapter 25 - Colloids in the Environmental Protection— Current and Future Trends. En: Fanun M, editor. The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection [Internet]. Amsterdam: Elsevier; 2014 [citado 29 de diciembre

- de 2022]. p. 635-77. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444632838000259>
27. Banchón C, Baquerizo R, Muñoz D, Zambrano L. Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales. Enfoque UTE [Internet]. diciembre de 2016 [citado 20 de enero de 2023];7(4):111-26. Disponible en:
http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1390-65422016000400111&lng=pt&nrm=iso&tlng=es
 28. Milani JM, Golkar A, Milani JM, Golkar A. Introductory Chapter [Internet]. Some New Aspects of Colloidal Systems in Foods. IntechOpen; 2019 [citado 29 de diciembre de 2022]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/state.item.id>
 29. Park SJ, Seo MK. Chapter 1 - Intermolecular Force. En: Park SJ, Seo MK, editores. Interface Science and Technology [Internet]. Elsevier; 2011 [citado 29 de diciembre de 2022]. p. 1-57. (Interface Science and Composites; vol. 18). Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123750495000013>
 30. Betancour B, Jimenez D, Linares B. Potencial Zeta (z) Como Criterio De Optimización De Dosificación De Coagulante En Planta De Tratamiento De Agua 110 Potable. Dyna [Internet]. 2012 [citado 30 de diciembre de 2022]; 79(175): 166-72. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49624958021>
 31. Jose Chirayil C, Abraham J, Kumar Mishra R, George SC, Thomas S. Chapter 1 - Instrumental Techniques for the Characterization of Nanoparticles. En: Thomas S, Thomas R, Zachariah AK, Mishra RK, editores. Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization [Internet]. Elsevier; 2017 [citado 20 de enero de 2023]. p. 1-36. (Micro and Nano Technologies). Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323461399000013>
 32. Abraham J, Jose B, Jose A, Thomas S. Chapter 2 - Characterization of green nanoparticles from plants. En: Thajuddin N, Mathew S, editores. Phytonanotechnology [Internet]. Elsevier; 2020 [citado 30 de diciembre de 2022]. p. 21-39. (Micro and Nano

- Technologies). Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128223482000024>
33. Lu GW, Gao P. CHAPTER 3 - Emulsions and Microemulsions for Topical and Transdermal Drug Delivery. En: Kulkarni VS, editor. Handbook of Non-Invasive Drug Delivery Systems [Internet]. Boston: William Andrew Publishing; 2010 [citado 20 de enero de 2023]. p. 59-94. (Personal Care & Cosmetic Technology). Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815520252100034>
34. Englande AJ, Krenkel P, Shamas J. Wastewater Treatment & Water Reclamation. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences [Internet]. 2015 [citado 20 de enero de 2023];B978-0-12-409548-9.09508-7. Disponible en:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7158167/>
35. Crini G, Lichtfouse E. Wastewater Treatment: An Overview. En: Crini G, Lichtfouse E, editores. Green Adsorbents for Pollutant Removal: Fundamentals and Design [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2018 [citado 2 de julio de 2023]. p. 1-21. (Environmental Chemistry for a Sustainable World). Disponible en:
https://doi.org/10.1007/978-3-319-92111-2_1
36. Manahan SE. Introducción a la química ambiental. Reverte; 2006. 788 p. Disponible en:
https://books.google.com.pe/books?id=5NR8DIk1n68C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false.
37. Richards G. Electrical Conductivity as an Indicator of Water Chemistry and Hydrologic Process. En 2008 [citado 6 de enero de 2025]. Disponible en:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Electrical-Conductivity-as-an-Indicator-of-Water-Richards/d1339c3f92cb6fda50b4b3f9a5b02df28bee9b72>
38. Baird RB, Eaton AD, Rice editors EW. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition [Internet]. Washington, DC; 2017. 1796 p. Disponible en:
<https://books.google.com.pe/books?id=V2LhtAEACAAJ&dq=Standard+Methods+for+the+Examination+of+Water+and+Wastewater&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiO48uop6D8AhUIJ7kGHXdrATkQ6AF6BAgCEAI>

39. Grobbelaar JU. Turbidity. En: Likens GE, editor. Encyclopedia of Inland Waters [Internet]. Oxford: Academic Press; 2009 [citado 20 de enero de 2023]. p. 699-704. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123706263000752>
40. Abu Shmeis RM. Chapter One - Water Chemistry and Microbiology. En: Chormey DS, Bakirdere S, Turan NB, Engin GÖ, editores. Comprehensive Analytical Chemistry [Internet]. Elsevier; 2018 [citado 20 de enero de 2023]. p. 1-56. (Fundamentals of Quorum Sensing, Analytical Methods and Applications in Membrane Bioreactors; vol. 81). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166526X18300023>
41. Koul B, Yadav D, Singh S, Kumar M, Song M. Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review. Water [Internet]. enero de 2022 [citado 2 de julio de 2023];14(21):3542. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/21/3542>
42. Aider M, de Halleux D, Melnikova I. Skim acidic milk whey cryoconcentration and assessment of its functional properties: Impact of processing conditions. Innovative Food Science & Emerging Technologies [Internet]. 1 de julio de 2009 [citado 20 de enero de 2023];10(3):334-41. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466856409000034>
43. Roohi, Zaheer MR, Gupta A. Chapter 17 - Current Development and Future Perspectives of Microbial Enzymes in the Dairy Industry. En: Kuddus M, editor. Enzymes in Food Biotechnology [Internet]. Academic Press; 2019 [citado 29 de diciembre de 2022]. p. 287-302. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128132807000177>
44. Bolognesi S, Ceconet D, Capodaglio AG. 5 - Agro-industrial wastewater treatment in microbial fuel cells. En: Abbassi R, Yadav AK, Khan F, Garaniya V, editores. Integrated Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment [Internet]. Butterworth-Heinemann; 2020

- [citado 29 de diciembre de 2022]. p. 93-133. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128174937000059>
45. Muniz GL, Silva TCF da, Borges AC. Assessment and optimization of the use of a novel natural coagulant (*Guazuma ulmifolia*) for dairy wastewater treatment. *Science of The Total Environment* [Internet]. 20 de noviembre de 2020 [citado 20 de enero de 2023];744:140864. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972034393X>
46. Trigueros DEG, Braun L, Hinterholz CL. Environmental and economic feasibility of the treatment of dairy industry wastewater by photo-Fenton and electrocoagulation process: Multicriteria optimization by desirability function. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* [Internet]. 1 de mayo de 2022 [citado 20 de enero de 2023];427:113820. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S101060302200051X>
47. Singh AK. Chapter 4 - Experimental Methodologies for the Characterization of Nanoparticles. En: Singh AK, editor. *Engineered Nanoparticles* [Internet]. Boston: Academic Press; 2016 [citado 20 de enero de 2023]. p. 125-70. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128014066000042>
48. Alvarez VB, Eastridge M, Ji T. Utilities and Effluent Treatment | Reducing the Negative Impact of the Dairy Industry on the Environment. En: Fuquay JW, editor. *Encyclopedia of Dairy Sciences (Second Edition)* [Internet]. San Diego: Academic Press; 2011 [citado 20 de enero de 2023]. p. 631-5. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744074005215>
49. Navas JSR. Aprovechamiento Industrial de Lactosuero Mediante Procesos Fermentativos. *Publicaciones e Investigación* [Internet]. 2 de junio de 2012 [citado 20 de enero de 2023];6:69-83. Disponible en:
<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/publicaciones-e-investigacion/article/view/1100>

50. Hernández JC, García FP, Cruz VER, Santillán YM, Marzo MAM. Caracterización fisicoquímica de un lactosuero: potencialidad de recuperación de fósforo. Acta Universitaria [Internet]. 1 de febrero de 2012 [citado 20 de enero de 2023];22(1):11-8. Disponible en: <https://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/view/304>
51. Poveda E E. Suero lácteo, generalidades y potencial uso como fuente de calcio de alta biodisponibilidad. Revista chilena de nutrición [Internet]. diciembre de 2013 [citado 2 de enero de 2023];40(4):397-403. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0717-75182013000400011&lng=es&nrm=iso&tlng=es
52. Mazorra-Manzano MÁ, Moreno-Hernández JM, Mazorra-Manzano MÁ, Moreno-Hernández JM. Propiedades y opciones para valorizar el lactosuero de la quesería artesanal. CienciaUAT [Internet]. diciembre de 2019 [citado 1 de enero de 2023];14(1):133-44. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-78582019000200133&lng=es&nrm=iso&tlng=es
53. Panesar PS, Kennedy JF, Gandhi DN, Bunko K. Bioutilisation of whey for lactic acid production. Food Chemistry [Internet]. 1 de enero de 2007 [citado 20 de enero de 2023];105(1):1-14. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814607002816>
54. Parra Huertas RA. Lactosuero: importancia en la industria de alimentos. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín [Internet]. junio de 2009 [citado 20 de enero de 2023];62(1):4967-82. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0304-28472009000100021&lng=en&nrm=iso&tlng=es
55. Wong NP, LaCroix DE, McDonough FE. Minerals in Whey and Whey Fractions. Journal of Dairy Science [Internet]. 1 de diciembre de 1978 [citado 1 de enero de 2023];61(12):1700-3. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030278837904>

56. Zandona E, Blažić M, Režek Jambrak A. Whey Utilization: Sustainable Uses and Environmental Approach. *Food Technol Biotechnol* [Internet]. junio de 2021 [citado 1 de enero de 2023];59(2):147-61. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8284110/>
57. Durham RJ, Hourigan JA. 14 - Waste management and co-product recovery in dairy processing. En: Waldron K, editor. *Handbook of Waste Management and Co-Product Recovery in Food Processing* [Internet]. Woodhead Publishing; 2007 [citado 20 de enero de 2023]. p. 332-87. (Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845690250500141>
58. Ntemi M, Paraschos S, Karakostas A, Gialampoukidis I, Vrochidis S, Kompatsiaris I. Infrastructure monitoring and quality diagnosis in CNC machining: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [Internet]. 1 de agosto de 2022 [citado 25 de agosto de 2024];38:631-49. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581722001079>
59. Malekjani N, Homayoonfal M, Baeghbali V, Ansarifar E, Hedayati S, Jafari SM. Chapter 3 - Optimization of the spray drying process parameters for the food and bioactive ingredients. En: Jafari SM, Samborska K, editores. *Spray Drying for the Food Industry* [Internet]. Woodhead Publishing; 2024 [citado 19 de abril de 2024]. p. 57-83. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128197998000090>
60. Li N, Shi C, Zhang Z, Wang H, Liu Y. A review on mixture design methods for geopolymer concrete. *Composites Part B: Engineering* [Internet]. 1 de diciembre de 2019 [citado 25 de agosto de 2024]; 178. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836819315070>
61. Meena A, Mali H, Patnaik A, Kumar S. 13- Investigation of wear characteristics of dental composites filled with nanohydroxyapatite and mineral trioxide aggregate. En: Thomas S, Balakrishnan P, Skreekala MS, editores. *Fundamental Biomaterials: Polymers* [Internet]. Woodhead Publishing Series in Biomaterials; 2018 [citado 19 de abril de

- 2024]. 287-305. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978008102194100013X>
62. Okolie JA, Epelle EI, Nanda S, Castello D, Dalai AJ, Kozinski JA. Modeling and process optimization of hydrothermal gasification for hydrogen production: A comprehensive review. *The Journal of Supercritical Fluids* [Internet]. julio de 2021 [citado 25 de agosto de 2024]; 173. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0896844621000383>
63. G Ghosh N, Pal PK, Nandi G. GMAW dissimilar welding of AISI 409 ferritic stainless steel to AISI 316L austenitic stainless steel by using AISI 308 filler wire. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [Internet]. agosto de 2017 [citado 25 de agosto de 2024]; 20(4): 1334-1341. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098616309703>
64. Sorokhaibam LG, Ahmaruzzaman M. Chapter 8 - Phenolic Wastewater Treatment: Development and Applications of New Adsorbent Materials. En: Ranade VV, Bhandari VM, editores. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse* [Internet]. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2014 [citado 20 de enero de 2023]. p. 323-68. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080999685000088>
65. Mustereț CP, Morosanu I, Ciobanu R, Plavan O, Gherghel A, Al-Refai M, et al. Assessment of Coagulation–Flocculation Process Efficiency for the Natural Organic Matter Removal in Drinking Water Treatment. *Water* [Internet]. enero de 2021 [citado 2 de julio de 2023];13(21):3073. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/21/3073>
66. Tetteh EK, Rathilal S, Tetteh EK, Rathilal S. Application of Organic Coagulants in Water and Wastewater Treatment [Internet]. *Organic Polymers*. IntechOpen; 2019 [citado 2 de enero de 2023]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/state.item.id>
67. Mollah MYA, Schennach R, Parga JR, Cocke DL. Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials* [Internet]. 1 de junio de 2001 [citado 2

- de enero de 2023];84(1):29-41. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389401001765>
68. Wei H, Gao B, Ren J, Li A, Yang H. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. *Water Research* [Internet]. 15 de octubre de 2018 [citado 3 de enero de 2023];143:608-31. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135418305724>
69. Saritha V, Srinivas N, Srikanth Vuppala NV. Analysis and optimization of coagulation and flocculation process. *Appl Water Sci* [Internet]. 1 de marzo de 2017 [citado 3 de enero de 2023];7(1):451-60. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0262-y>
70. Ruiz A. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revisa Lasallista de Investigación* [Internet]. 2005 [citado 3 de enero de 2023]; 2(1): 49-56. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>
71. Souza Dos Santos B, Eyng E, Baraldi IJ, Frare LM, Affonso Pisano Mateus G, Bergamasco R, et al. Life performance evaluation of lyophilized Moringa biocoagulant: An alternative for prolonging the biocoagulant efficiency. *Environmental Progress & Sustainable Energy* [Internet]. 2021 [citado 10 de enero de 2023];40(3):e13538. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ep.13538>
72. Johnson I, Sithik Ali MA, Kumar M. Chapter 10 - Cyanobacteria/Microalgae for Distillery Wastewater Treatment- Past, Present and the Future. En: Shah MP, Rodriguez-Couto S, editores. *Microbial Wastewater Treatment* [Internet]. Elsevier; 2019 [citado 20 de enero de 2023]. p. 195-236. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128168097000105>
73. El-taweel RM, Mohamed N, Alrefaey KA, Husien S, Abdel-Aziz AB, Salim AI, et al. A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models; RSM, and ANN. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry* [Internet]. 1 de enero de 2023 [citado 3 de julio de 2023];6:100358. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666086523000048>

74. Boinpally S, Kolla A, Kainthola J, Kodali R, Vemuri J. A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle* [Internet]. 1 de enero de 2023 [citado 3 de julio de 2023];4:26-36. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666445323000016>
75. Kumar PS. Chapter eight - Microplastics and its removal strategies from marine water. En: Kumar PS, editor. *Modern Treatment Strategies for Marine Pollution* [Internet]. Elsevier; 2021 [citado 2 de enero de 2023]. p. 125-44. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128222799000038>
76. Hu H, Xu K. Chapter 8 - Physicochemical technologies for HRP and risk control. En: Ren H, Zhang X, editores. *High-Risk Pollutants in Wastewater* [Internet]. Elsevier; 2020 [citado 2 de enero de 2023]. p. 169-207. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128164488000083>
77. Kurniawan SB, Abdullah SRS, Imron MF, Said NSM, Ismail N 'Izzati, Hasan HA, et al. Challenges and Opportunities of Biocoagulant/Biofloculant Application for Drinking Water and Wastewater Treatment and Its Potential for Sludge Recovery. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. diciembre de 2020 [citado 3 de julio de 2023];17(24):9312. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7764310/>
78. Koul B, Bhat N, Abubakar M, Mishra M, Arukha AP, Yadav D. Application of Natural Coagulants in Water Treatment: A Sustainable Alternative to Chemicals. *Water* [Internet]. enero de 2022 [citado 3 de julio de 2023];14(22):3751. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/22/3751>
79. Otálora MC, Wilches-Torres A, Lara CR, Cifuentes GR, Gómez Castaño JA. Use of *Opuntia ficus-indica* Fruit Peel as a Novel Source of Mucilage with Coagulant Physicochemical/Molecular Characteristics. *Polymers* [Internet]. enero de 2022 [citado 3 de enero de 2023];14(18):3832. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/18/3832>
80. Hernández-Becerra E, de los Angeles Aguilera-Barreiro M, Contreras-Padilla M, Pérez-Torrero E, Rodríguez-García ME. Nopal cladodes (*Opuntia Ficus Indica*): Nutritional

- properties and functional potential. *Journal of Functional Foods* [Internet]. 1 de agosto de 2022 [citado 3 de enero de 2023];95:105183. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1756464622002535>
81. Adjeroud N, Dahmoune F, Merzouk B, Leclerc JP, Madani K. Improvement of electrocoagulation–electroflotation treatment of effluent by addition of *Opuntia ficus indica* pad juice. *Separation and Purification Technology* [Internet]. 15 de abril de 2015 [citado 20 de enero de 2023];144:168-76. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586615001021>
82. Martínez-Cruz A, Rojas Valencia MN, Araiza-Aguilar JA, Nájera-Aguilar HA, Gutiérrez-Hernández RF. Leachate treatment: comparison of a bio-coagulant (*Opuntia ficus mucilage*) and conventional coagulants using multi-criteria decision analysis. *Heliyon* [Internet]. 1 de julio de 2021 [citado 20 de enero de 2023];7(7):e07510. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021016133>
83. Medina-Torres L, Brito-De La Fuente E, Torrestiana-Sanchez B, Katthain R. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids* [Internet]. 1 de septiembre de 2000 [citado 4 de enero de 2023];14(5):417-24. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X00000151>
84. Mier MV, Callejas RL, Rodríguez JF, Peña HT, Ramos AL, Valencia MNR. APLICACIÓN DEL NOPAL (*Opuntia ficus indica*) COMO COAGULANTE PRIMARIO DE AGUAS RESIDUALES. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales Investigación, desarrollo y práctica* [Internet]. 2014 [citado 20 de enero de 2023];210-6. Disponible en: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/46815>
85. Adjeroud-Abdellatif N, Hammoui Y, Boudria A, Agab S, Choulak F, Leclerc JP, et al. Effect of a natural coagulant extract from *Opuntia ficus-indica* cladode on electrocoagulation-electroflotation water treatment process. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* [Internet]. 23 de diciembre de 2022 [citado 20 de enero de 2023];102(17):5822-46. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1804889>

86. Di Lorenzo F, Silipo A, Molinaro A, Parrilli M, Schiraldi C, D'Agostino A, et al. The polysaccharide and low molecular weight components of *Opuntia ficus indica* cladodes: Structure and skin repairing properties. *Carbohydrate Polymers* [Internet]. 10 de febrero de 2017 [citado 4 de enero de 2023];157:128-36. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861716311298>
87. Otálora MC, Wilches-Torres A, Castaño JAG. Extraction and Physicochemical Characterization of Dried Powder Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes and Aloe Vera Leaves: A Comparative Study. *Polymers (Basel)* [Internet]. 22 de mayo de 2021 [citado 4 de enero de 2023];13(11):1689. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8196875/>
88. Choudhary M, Ray MB, Neogi S. Evaluation of the potential application of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a bio-coagulant for pre-treatment of oil sands process-affected water. *Separation and Purification Technology* [Internet]. 31 de enero de 2019 [citado 4 de enero de 2023];209:714-24. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586618316046>
89. T. Nharingo, M. T. Zivurawa, U. Guyo. 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* [Internet]. 2015;12(12):3791-802. Disponible en: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/4584829>
90. PubChem. L-Arabinose [Internet]. [citado 18 de abril de 2024]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/439195>
91. PubChem. D-Galacturonic Acid [Internet]. [citado 18 de abril de 2024]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/439215>
92. PubChem. D-Galactose [Internet]. [citado 18 de abril de 2024]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6036>
93. PubChem. D-Rhamnose [Internet]. [citado 18 de abril de 2024]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5460029>

94. PubChem. D-Xylose [Internet]. [citado 18 de abril de 2024]. Disponible en: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/135191>
95. Oliveira Lima K, Barreto Pinilla CM, Alemán A, López-Caballero ME, Gómez-Guillén MC, Montero P, et al. Characterization, Bioactivity and Application of Chitosan-Based Nanoparticles in a Food Emulsion Model. *Polymers (Basel)* [Internet]. 29 de septiembre de 2021 [citado 3 de enero de 2023];13(19):3331. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8512445/>
96. Ahmed TA, Aljaeid BM. Preparation, characterization, and potential application of chitosan, chitosan derivatives, and chitosan metal nanoparticles in pharmaceutical drug delivery. *Drug Des Devel Ther* [Internet]. 28 de enero de 2016 [citado 3 de enero de 2023];10:483-507. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4734734/>
97. Velásquez CL. Quitina y quitosano: materiales del pasado para el presente y el futuro. *Avances en Química* [Internet]. 2006 [citado 20 de enero de 2023];1(2):15-21. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93310204>
98. Aranaz I, Alcántara AR, Civera MC, Arias C, Elorza B, Heras Caballero A, et al. Chitosan: An Overview of Its Properties and Applications. *Polymers (Basel)* [Internet]. 24 de septiembre de 2021 [citado 3 de enero de 2023];13(19):3256. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8512059/>
99. Cheung RCF, Ng TB, Wong JH, Chan WY. Chitosan: An Update on Potential Biomedical and Pharmaceutical Applications. *Mar Drugs* [Internet]. 14 de agosto de 2015 [citado 3 de enero de 2023];13(8):5156-86. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4557018/>
100. Giraldo Pedraza J. Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano. 2015.
101. Renault F, Sancey B, Badot PM, Crini G. Chitosan for coagulation/flocculation processes – An eco-friendly approach. *European Polymer Journal* [Internet]. 1 de mayo de 2009

- [citado 20 de enero de 2023];45(5):1337-48. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305708007222>
102. Tran NVN, Yu QJ, Nguyen TP, Wang SL. Coagulation of Chitin Production Wastewater from Shrimp Scraps with By-Product Chitosan and Chemical Coagulants. *Polymers* [Internet]. marzo de 2020 [citado 3 de enero de 2023];12(3):607. Disponible en:
<https://www.mdpi.com/2073-4360/12/3/607>
103. Bakshi PS, Selvakumar D, Kadirvelu K, Kumar NS. Chitosan as an environment friendly biomaterial – a review on recent modifications and applications. *International Journal of Biological Macromolecules* [Internet]. 1 de mayo de 2020 [citado 3 de enero de 2023];150:1072-83. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813018357933>
104. Valencia GA. Efecto antimicrobiano del quitosano: una revisión de la literatura. *Revista Scientia Agroalimentaria* [Internet]. 16 de diciembre de 2015 [citado 20 de enero de 2023];2. Disponible en: <http://revistas.ut.edu.co/index.php/scientiaagro/article/view/743>
105. Shabanian M, Hajibeygi M, Raeisi A. 2 - FTIR characterization of layered double hydroxides and modified layered double hydroxides. En: Thomas S, Daniel S, editores. *Layered Double Hydroxide Polymer Nanocomposites* [Internet]. Woodhead Publishing; 2020 [citado 5 de enero de 2023]. p. 77-101. (Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering). Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081019030000027>
106. Dutta A. Chapter 4 - Fourier Transform Infrared Spectroscopy. En: Thomas S, Thomas R, Zachariah AK, Mishra RK, editores. *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization* [Internet]. Elsevier; 2017 [citado 5 de enero de 2023]. p. 73-93. (Micro and Nano Technologies). Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323461405000042>
107. Sindhu R, Binod P, Pandey A. Chapter 17 - Microbial Poly-3-Hydroxybutyrate and Related Copolymers. En: Pandey A, Höfer R, Taherzadeh M, Nampoothiri KM, Larroche C, editores. *Industrial Biorefineries & White Biotechnology* [Internet]. Amsterdam:

- Elsevier; 2015 [citado 20 de enero de 2023]. p. 575-605. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444634535000197>
108. Wen S, Liu J, Deng J. Chapter 3 - Methods for the detection and composition study of fluid inclusions. En: Wen S, Liu J, Deng J, editores. Fluid Inclusion Effect in Flotation of Sulfide Minerals [Internet]. Elsevier; 2021 [citado 20 de enero de 2023]. p. 27-68. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012819845200003X>
109. McMurry JE. Organic Chemistry [Internet]. Cengage Learning; 2011. 1376 p. Disponible en: https://books.google.com.pe/books?id=t-oJzgEACAAJ&dq=organic+chemistry+mcmurry&hl=es&sa=X&redir_esc=y
110. Koocheki A, Mortazavi SA, Shahidi F, Razavi SMA, Taherian AR. Rheological properties of mucilage extracted from Alyssum homolocarpum seed as a new source of thickening agent. Journal of Food Engineering [Internet]. 1 de abril de 2009 [citado 20 de enero de 2023];91(3):490-6. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877408004883>
111. Djerroud N, Adjeroud N, Felkai-Haddache L, Hammoui Y, Remini H, Dahmoune F, et al. Enhanced electrocoagulation–electroflotation for turbidity removal by Opuntia ficus indica cladode mucilage. Water and Environment Journal [Internet]. 2018 [citado 20 de enero de 2023];32(3):321-32. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/wej.12328>
112. Luna-Sosa B, Martinez-Avila GCG, Rodriguez-Fuentes H, Pastrana LM, Azevedo AG, Gonzalez-Sandoval DC, et al. Extraction and characterization of mucilage from Opuntia ficus-indica cultivated on hydroponic system. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca [Internet]. 21 de marzo de 2022 [citado 10 de abril de 2024];50(1):12460-12460. Disponible en: <https://www.notulaebotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/12460>
113. Omar BA, Elmasry R, Eita A, Soliman MM, El-Tahan AM, Sitohy M. Upgrading the preparation of high-quality chitosan from Procambarus clarkii wastes over the traditional

- isolation of shrimp chitosan. Saudi Journal of Biological Sciences [Internet]. 1 de febrero de 2022 [citado 12 de junio de 2023];29(2):911-9. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319562X21008937>
114. de Queiroz Antonino RSCM, Lia Fook BRP, de Oliveira Lima VA, de Farias Rached RÍ, Lima EPN, da Silva Lima RJ, et al. Preparation and Characterization of Chitosan Obtained from Shells of Shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boone). Mar Drugs [Internet]. 15 de mayo de 2017 [citado 11 de enero de 2023];15(5):141. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5450547/>
115. Mathaba M, Daramola MO. Effect of Chitosan's Degree of Deacetylation on the Performance of PES Membrane Infused with Chitosan during AMD Treatment. Membranes [Internet]. 24 de marzo de 2020 [citado 11 de abril de 2024]; 10(3). Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7142423/>
116. Cañón AFR, Carrillo CGH, Cuaspud JAG. Evaluation of physicochemical properties of Nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) as bio coagulant-flocculant for water treatment. J Phys: Conf Ser [Internet]. octubre de 2021 [citado 8 de enero de 2023];2046(1):012057. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012057>
117. Fatima B. Quantitative Analysis by IR: Determination of Chitin/Chitosan DD. En: Modern Spectroscopic Techniques and Applications [Internet]. IntechOpen; 2020 [citado 4 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/69656>
118. Vedula SS, Yadav GD. Wastewater treatment containing methylene blue dye as pollutant using adsorption by chitosan lignin membrane: Development of membrane, characterization and kinetics of adsorption. Journal of the Indian Chemical Society [Internet]. 1 de enero de 2022 [citado 20 de enero de 2023];99(1):100263. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019452221002636>
119. Balya H, Radhakrishnan A, Jabaris SL, D.v.r. SG, Kuppusamy G, Seetharaman S. Fabrication of novel bio-compatible cefixime nanoparticles using chitosan and Azadirachta indica fruit mucilage as natural polymers. Journal of Drug Delivery Science and Technology [Internet]. 1 de diciembre de 2021 [citado 20 de enero de

- 2023];66:102750. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1773224721004305>
120. Dominguez-Martinez BM, Martínez-Flores HE, Berrios JDJ, Otoni CG, Wood DF, Velazquez G. Physical Characterization of Biodegradable Films Based on Chitosan, Polyvinyl Alcohol and Opuntia Mucilage. J Polym Environ [Internet]. 1 de septiembre de 2017 [citado 20 de enero de 2023];25(3):683-91. Disponible en:
<https://doi.org/10.1007/s10924-016-0851-y>
121. Procacci S, Bojórquez-Quintal E, Platamone G, Maccioni O, Vecchio VL, Morreale V, et al. Opuntia ficus-indica Pruning Waste Recycling: Recovery and Characterization of Mucilage from Cladodes. NR [Internet]. 2021 [citado 10 de abril de 2024];12(04):91-107. Disponible en:
<https://www.scirp.org/journal/doi.aspx?doi=10.4236/nr.2021.124008>
122. Sepúlveda E. Extraction and characterization of mucilage in Opuntia spp. - ScienceDirect [Internet]. [citado 10 de abril de 2024]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014019630600259X>
123. Vargas-Solano SV, Rodríguez-González F, Martínez-Velarde R, Campos-Mendiola R, Hurtado-Salgado MA, Ponniah JM. Composición química del mucílago de nopal en diferentes etapas de madurez. Agrociencia [Internet]. 9 de marzo de 2022 [citado 10 de abril de 2024]; Disponible en: <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/2726>
124. Srinivasan H, Velayutham K, Ravichandran R. Chitin and chitosan preparation from shrimp shells *Penaeus monodon* and its human ovarian cancer cell line, PA-1 - ScienceDirect [Internet]. 2018 [citado 31 de octubre de 2024]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813017326594?via%3Dihub>
125. Soon CY, Tee YB, Tan CH, Rosnita AT, Khalina A. Extraction and physicochemical characterization of chitin and chitosan from *Zophobas morio* larvae in varying sodium hydroxide concentration. International Journal of Biological Macromolecules [Internet].

- 1 de marzo de 2018 [citado 31 de octubre de 2024];108:135-42. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813017327630>
126. Queiroz MF, Teodosio Melo KR, Sabry DA, Sasaki GL, Rocha HAO. Does the Use of Chitosan Contribute to Oxalate Kidney Stone Formation? *Mar Drugs* [Internet]. 29 de diciembre de 2014 [citado 12 de abril de 2024];13(1):141-58. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4306929/>
127. Tanhaei B, Ayati A, Bamoharram FF, Lahtinen M, Sillanpää M. A novel magnetic Preyssler acid grafted chitosan nano adsorbent: synthesis, characterization and adsorption activity. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* [Internet]. 2016 [citado 11 de abril de 2024];91(5):1452-60. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.4742>
128. Varan N. The Use of Titration Technique and FTIR Bands to Determine the Deacetylation Degree of Chitosan Samples | Abstract. *Journal of Textile Science & Engineering* [Internet]. 2017 [citado 4 de noviembre de 2024];7(1). Disponible en: <https://www.hilarispublisher.com/abstract/the-use-of-titration-technique-and-ftir-bands-to-determine-the-deacetylation-degree-of-chitosan-samples-21191.html>
129. Colina M, Ayala A, Rincón D, Molina J, Medina J, Yncierte R, et al. Evaluación de los procesos para la obtención química de quitina y quitosano a partir de desechos de cangejos escala piloto e industrial. *Revista Iberoamericana de Polímeros* [Internet]. 2014 [citado 18 de abril de 2024];15(1):21-43. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4554249>
130. Rohyami Y, Sari NA. Simple method on determination of deacetylation degree for chitosan. 1 de septiembre de 2021 [citado 4 de noviembre de 2024];2370:030003. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AIPC.2370c0003R>
131. Novikov VY, Derkach SR, Konovalova IN, Dolgopyatova NV, Kuchina YA. Mechanism of Heterogeneous Alkaline Deacetylation of Chitin: A Review. *Polymers* [Internet]. enero de 2023 [citado 11 de abril de 2024];15(7):1729. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/7/1729>

132. Bhalkaran S, Wilson LD. Investigation of Self-Assembly Processes for Chitosan-Based Coagulant-Flocculant Systems: A Mini-Review. *International Journal of Molecular Sciences* [Internet]. 30 de septiembre de 2016 [citado 5 de noviembre de 2024];17(10):1662. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5085695/>
133. Kim S. Competitive Biological Activities of Chitosan and Its Derivatives: Antimicrobial, Antioxidant, Anticancer, and Anti-Inflammatory Activities. *International Journal of Polymer Science* [Internet]. 19 de julio de 2018 [citado 11 de abril de 2024];2018:e1708172. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/ijps/2018/1708172/>
134. Hassan MAA, Li TP, Noor ZZ. Coagulation and flocculation treatment of wastewater in textile industry using chitosan. *Journal of Chemical and Natural Resources Engineering* [Internet]. 2009 [citado 11 de abril de 2024]; 4(1): 43-53. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/11782643.pdf>
135. Rujiravanit R, Kantakanun M, Chokradjaroen C, Vanichvattanadecha C, Saito N. Simultaneous deacetylation and degradation of chitin hydrogel by electrical discharge plasma using low sodium hydroxide concentrations. *Carbohydrate Polymers* [Internet]. 15 de enero de 2020 [citado 11 de abril de 2024];228:115377. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861719310446>
136. Kandile NG, Zaky HT, Mohamed MI, Nasr AS, Ali YG. Extraction and Characterization of Chitosan from Shrimp Shells. *Open Journal of Organic Polymer Materials* [Internet]. 20 de julio de 2018 [citado 3 de noviembre de 2024];8(3):33-42. Disponible en: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=86117>
137. Boudouaia N, Bengharez Z. Preparation and characterization of chitosan extracted from shrimp shells waste and chitosan film: application for Eriochrome black T removal from aqueous solutions | *Applied Water Science* [Internet]. 2019 [citado 3 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-019-0967-z>
138. Khairi S, Wibowo P, Wijoyo RBT, Rezeki S. Pengaruh Konsentrasi NaOH pada Deasetilasi Kitin dari Cangkang Udang Putih (*Litopenaeus vannamei*) dan Aktivasnya

- pada Air Gambut. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah* [Internet]. 10 de noviembre de 2019 [citado 4 de noviembre de 2024];7(1):037-43. Disponible en: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jmtluntan/article/view/37374>
139. Potivas T, Laokuldilok T. Deacetylation of Chitin and the Properties of Chitosan Films with Various Deacetylation Degrees. *CMUJNS* [Internet]. 2014 [citado 4 de noviembre de 2024];13(1). Disponible en: <http://cmuj.cmu.ac.th/Journal-of-Natural-Sciences/Special-Issue/Volume-13/Number-1-Food-and-Applied-Bioscience-December-2014.php>
 140. Younes I, Ghorbel-Bellaj O, Chaabouni M, Rinaudo M, Souard F, Vanhaverbeke C, Jellouli K, Nasri M. Use of a fractional factorial design to study the effects of experimental factors on the chitin deacetylation. *International Journal of Biological Macromolecules* [Internet]. septiembre de 2014 [citado 4 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813014004346>
 141. No HK, Cho YI, Kim HR, Meyers SP. Effective deacetylation of chitin under conditions of 15 psi/121 degrees C. *J Agric Food Chem.* junio de 2000;48(6):2625-7.
 142. Czechowska-Biskup R, Rosiak J. Determination of degree of deacetylation of chitosan - comparison of methods. En 2012 [citado 11 de abril de 2024]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/DETERMINATION-OF-DEGREE-OF-DEACETYLATION-OF-OF-Czechowska-Biskup-Rosiak/761fdbced553861589322c27c077f3bdc48f60fd>
 143. Sánchez-Machado DI, López-Cervantes J, Escárcega-Galaz AA, Campas-Baypoli ON, Martínez-Ibarra DM, Rascón-León S. Measurement of the degree of deacetylation in chitosan films by FTIR, ¹H NMR and UV spectrophotometry. *MethodsX* [Internet]. 1 de junio de 2024 [citado 11 de abril de 2024];12:102583. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016124000372>
 144. Kallay N, Kovačević D, Žalac S. Chapter 6 - Thermodynamics of the solid/liquid interface - its application to adsorption and colloid stability - ScienceDirect [Internet].

- Vol. 11. 2006 [citado 14 de noviembre de 2024]. 133-170 p. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1573428506800505>
145. Sharma M. Chapter 18 - Transdermal and Intravenous Nano Drug Delivery Systems: Present and Future. En: Mohapatra SS, Ranjan S, Dasgupta N, Mishra RK, Thomas S, editores. Applications of Targeted Nano Drugs and Delivery Systems [Internet]. Elsevier; 2019 [citado 14 de noviembre de 2024]. p. 499-550. (Micro and Nano Technologies). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128140291000181>
146. Coleman CK, Oza HH, Bailey ES, Sobsey MD. A Review of Chitosan as a Coagulant of Health-Related Microorganisms in Water and Wastewater. *Environments* [Internet]. octubre de 2024 [citado 15 de noviembre de 2024];11(10):211. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3298/11/10/211>
147. Yang R, Li H, Huang M, Yang H, Li A. A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment. *Water Research* [Internet]. mayo de 2016 [citado 15 de noviembre de 2024];95:59-89. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043135416301270>
148. Holmes EB, Oza HH, Bailey ES, Sobsey MD. Evaluation of Chitosans as Coagulants—Flocculants to Improve Sand Filtration for Drinking Water Treatment. *International Journal of Molecular Sciences* [Internet]. 9 de enero de 2023 [citado 24 de octubre de 2024];24(2):1295. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9865057/>
149. Gaviria-Bedoya A, Rubio-Clemente A. Coagulant and flocculant effect of *Opuntia ficus-indica* in water treatment. *Afinidad Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry* [Internet]. 15 de mayo de 2024 [citado 24 de octubre de 2024];81(602):112-22. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/428768>
150. Contreras Lozano KP, Mendoza J, Salcedo Mendoza G, Olivero Verbel R, Mendoza Ortega GP. El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Producción + Limpia* [Internet]. enero de 2015 [citado 19 de abril

- de 2024];10(1):40-50. Disponible en:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552015000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=es
151. Bouaouine O, Bourven I, Khalil F, Bressollier P, Baudu M. Identification and role of *Opuntia ficus indica* constituents in the flocculation mechanism of colloidal solutions. Separation and Purification Technology [Internet]. 31 de enero de 2019 [citado 20 de noviembre de 2024];209:892-9. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586618317647>
152. Islam MS, Sojib MA, Islam T, Shuvo SM, Nesa J. A review on Natural Coagulants in Wastewater Treatment. En Rajshahi University of Engineering & Technology, Rajshahi, Bangladesh; 2023.
153. Deepa D, Keerthana R, Pratheep Kumar R, Suryaprakash R. Primary treatment of dairy wastewater using bio based natural coagulants. Materials Today: Proceedings [Internet]. 1 de enero de 2022 [citado 10 de noviembre de 2024];60:616-21. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322007003>
154. Dkhissi O, El Hakmaoui A, Chatoui M, Bouyakhssas R, Bakraouy H, Agustiono T et al. Vegetable Oil Refinery Wastewater Treatment by Using the Cactus as a Bio flocculant in the Coagulation-Flocculation Process | Water, Air, & Soil Pollution [Internet]. [citado 10 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-023-06337-1>
155. Eh K, Thj M, N M. Use of Natural Coagulants for Removal of COD, Oil and Turbidity from Produced Waters in the Petroleum Industry. J Pet Environ Biotechnol [Internet]. 2018 [citado 10 de noviembre de 2024];09(03). Disponible en:
<https://www.omicsonline.org/open-access/use-of-natural-coagulants-for-removal-of-cod-oil-and-turbidity-from-produced-waters-in-the-petroleum-industry-2157-7463-1000374-104392.html>
156. Muniz GL, Borges AC, Da Silva TCF, Batista RO, De Castro SR. Chemically enhanced primary treatment of dairy wastewater using chitosan obtained from shrimp wastes:

- optimization using a Doehlert matrix design. *Environmental Technology* [Internet]. 15 de enero de 2022 [citado 11 de noviembre de 2024];43(2):237-54. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09593330.2020.1783372>
157. Kazi T, Virupakshi AS. Treatment of Tannery Wastewater Using Natural Coagulants. En 2013 [citado 10 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Treatment-of-Tannery-Wastewater-Using-Natural-Kazi-Virupakshi/647292ea46db23cd528510032106c5aab9eff09c>
158. Kaur B, Garg R, Anirudh PS. Treatment of Wastewater from Pulp and Paper Mill using Coagulation and Flocculation. En: *Journal of Environmental Treatment Techniques* [Internet]. 2020 [citado 10 de noviembre de 2024]. p. 158-63. Disponible en: <http://www.jett.dormaj.com/docs/Volume9/Issue%201/Treatment%20of%20Wastewater%20from%20Pulp%20and%20Paper%20Mill%20using%20Coagulation%20and%20Flocculation.pdf>
159. Mophin-Kani K. Exploring the use of orange peel and neem leaf powder as alternative coagulant in treatment of dairy wastewater. En 2016 [citado 10 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/EXPLORING-THE-USE-OF-ORANGE-PEEL-AND-NEEM-LEAF-AS-Mophin-Kani/e8ed688e9f127c0b03ee2060957c5ec6d43e7ce6>
160. Ronke RA, Saidat OG, Abdulwahab G. Coagulation-Flocculation Treatment of Industrial Wastewater Using Tamarind Seed Powder. En 2016 [citado 10 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Coagulation-Flocculation-Treatment-of-Using-Seed-Ronke-Saidat/405c1e165c85d33ad3af734007bbebb60b4afa4f>
161. Chuiza-Rojas MR, Calderón SH, Vargas-Escobar JA, Borja-Mayorga DF, Rennola-Alarcón L. Clarificación de un agua residual de una industria láctea mediante coagulación con Tuna (*Opuntia ficus indica*). *Ciencia e Ingeniería* [Internet]. 2019 [citado 7 de enero de 2023];40(3):245-52. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5075/507567854003/>

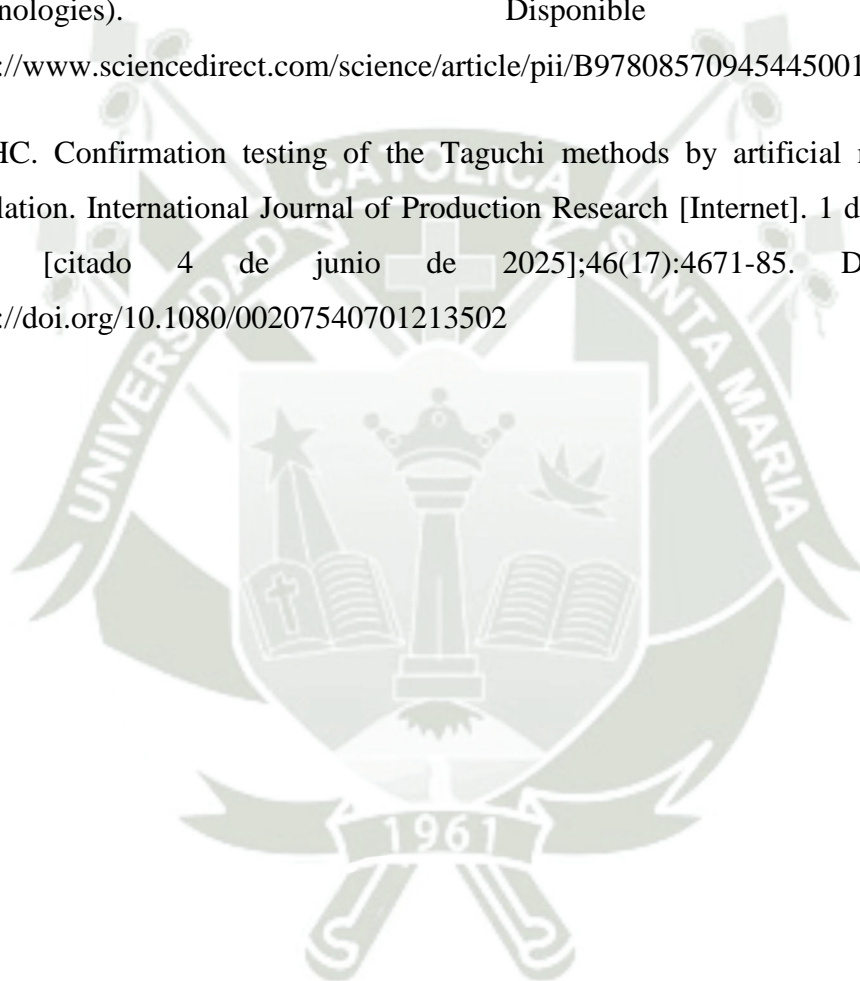
162. Lisintuña WF, Cerda EF, García MA. Tratamiento de aguas residuales de una industria lactea con mucilago de nopal (*Opuntia ficus-indica* [L.] mill.) / Wastewater treatment of a milk industry with nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica* [L.] Mill.). *Ciencia y Tecnología de los Alimentos* [Internet]. 1 de mayo de 2020 [citado 11 de noviembre de 2024];30(2):52-8. Disponible en: <https://go.gale.com/ps/i.do?p=IFME&sw=w&issn=08644497&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA642960687&sid=googleScholar&linkaccess=abs>
163. Geetha Devi M, Dumaran JJ, Feroz S. Dairy Wastewater Treatment Using Low Molecular Weight Crab Shell Chitosan [Internet]. 2013 [citado 11 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40034-012-0005-2>
164. Chi FH, Cheng WP. Use of Chitosan as Coagulant to Treat Wastewater from Milk Processing Plant. *J Polym Environ* [Internet]. 1 de octubre de 2006 [citado 10 de noviembre de 2024];14(4):411-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0027-2>
165. Hashim L, Khaleel I, Al-Aubadi I. Application of Cactus *Cladodes* Mucilage (*Opuntia ficus-indica*) as an Eco-Friendly Natural Coagulant and Flocculent Aid with Alum for Potable Water Treatment. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 1 de agosto de 2017;6:589-539.
166. França Figueiredo F, Karoliny Formicoli de Souza Freitas T, Gonçalves Dias G, Cesar Lopes Geraldino H, Paula Jambers Scandelai A, Junkes Vilvert A, et al. Textile-effluent treatment using Aloe vera mucilage as a natural coagulant prior to a photo-Fenton reaction. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* [Internet]. 1 de agosto de 2022 [citado 20 de enero de 2023];429:113948. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1010603022001770>
167. Getahun M, Asaithambi P, Befekadu A, Alemayehu E. Optimization of indigenous natural coagulants process for nitrate and phosphate removal from wet coffee processing wastewater using response surface methodology: In the case of Jimma Zone Mana district. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* [Internet]. diciembre

- de 2023 [citado 11 de noviembre de 2024]; 8. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016423000750>
168. Vijayaraghavan G, Sivakumar T, Kumar AV. Application of plant based coagulants for waste water treatment. En 2011 [citado 13 de enero de 2025]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/APPLICATION-OF-PLANT-BASED-COAGULANTS-FOR-WASTE-Vijayaraghavan-Sivakumar/f5dc1a3896cd1f1c67e0c277ebf970e8afae89>
169. Raghunath BV, Punnagaiarasi A, Rajarajan G, Irshad A, Elango A, Kumar GM. Impact of Dairy Effluent on Environment—A Review. En: Prashanthi M, Sundaram R, editores. Integrated Waste Management in India [Internet]; 2016 [citado 11 de noviembre de 2024]. p. 239-249. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-27228-3_22
170. Prazeres AR, Carvalho F, Rivas J. Fenton-like application to pretreated cheese whey wastewater. Journal of Environmental Management [Internet]. noviembre de 2013 [citado 11 de noviembre de 2024];129:199-205. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479713004866>
171. Santo CE, Vilar VJP, Botelho CMS, Bhatnagar A, Kumar E, Boaventura RAR. Optimization of coagulation–flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant. Chemical Engineering Journal [Internet]. febrero de 2012 [citado 15 de noviembre de 2024];183:117-23. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894711015919>
172. Chaloulos P, Vasilopoulos N, Mandala I. Blends of Cactus Cladode Powder with Corn Starch, Milk Proteins and Gelatin: Rheological Evaluation and Application to a Soup Model | Food and Bioprocess Technology. 2023 [citado 22 de noviembre de 2024];16:1343-55. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-023-03004-5>
173. Novák P, Havlíček V. 4 - Protein Extraction and Precipitation. En: Ciborowski P, Silberring J, editores. Proteomic Profiling and Analytical Chemistry (Second Edition)

- [Internet]. Boston: Elsevier; 2016 [citado 22 de noviembre de 2024]. p. 51-62. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444636881000045>
174. Chandrapala J, Duke MC, Gray SR, Zisu B, Weeks M, Palmer M, et al. Properties of acid whey as a function of pH and temperature. *Journal of Dairy Science* [Internet]. 1 de julio de 2015 [citado 22 de noviembre de 2024];98(7):4352-63. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030215003094>
175. Pardo-Castaño C, Bolaños G. Solubility of chitosan in aqueous acetic acid and pressurized carbon dioxide-water: Experimental equilibrium and solubilization kinetics. *The Journal of Supercritical Fluids* [Internet]. 1 de septiembre de 2019 [citado 22 de noviembre de 2024];151:63-74. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0896844618306582>
176. Alehosseini E, Shahiri Tabarestani H, Kharazmi MS, Jafari SM. Physicochemical, Thermal, and Morphological Properties of Chitosan Nanoparticles Produced by Ionic Gelation. *Foods* [Internet]. enero de 2022 [citado 22 de noviembre de 2024];11(23):3841. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/23/3841>
177. Dhanjai, Sinha A, Zhao H, Chen J, Mugo SM. Water Analysis | Determination of Chemical Oxygen Demand☆. En: Worsfold P, Poole C, Townshend A, Miró M, editores. *Encyclopedia of Analytical Science (Third Edition)* [Internet]. Oxford: Academic Press; 2019 [citado 22 de noviembre de 2024]. p. 258-70. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095472145172>
178. Bendicho C, Lavilla I. Water Analysis | Sewage☆. En: Worsfold P, Poole C, Townshend A, Miró M, editores. *Encyclopedia of Analytical Science (Third Edition)* [Internet]. Oxford: Academic Press; 2019 [citado 22 de noviembre de 2024]. p. 371-81. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095472115197>
179. Menéndez Gutiérrez C, Dueñas Moreno J. Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* [Internet]. diciembre de 2018 [citado 22 de noviembre de 2024];39(3):97-107. Disponible

en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382018000300097&lng=es&nrm=iso&tlng=es

180. Akbari M, Asadi P, Besharati Givi MK, Khodabandehlouie G. 13 - Artificial neural network and optimization. En: Givi MKB, Asadi P, editores. Advances in Friction-Stir Welding and Processing [Internet]. Woodhead Publishing; 2014 [citado 3 de junio de 2025]. p. 543-99. (Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857094544500136>
181. Co HC. Confirmation testing of the Taguchi methods by artificial neural-networks simulation. International Journal of Production Research [Internet]. 1 de septiembre de 2008 [citado 4 de junio de 2025];46(17):4671-85. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00207540701213502>



ANEXOS

Anexo 1: Figuras de la metodología:



Figura 23. Nopal cortado dejado en maceración por 24 horas.



Figura 24. Proceso de filtrado del extracto de nopal.



Figura 25. Extracto de nopal post-filtrado.



Figura 26. Extracto de nopal sumergido en etanol al 95%.

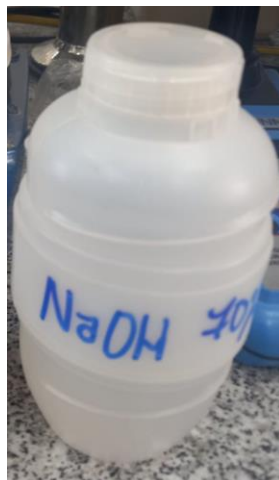


Figura 27. Solución preparada de NaOH al 70%.



Figura 28. Titulación de HCl 1M con NaOH 1M.

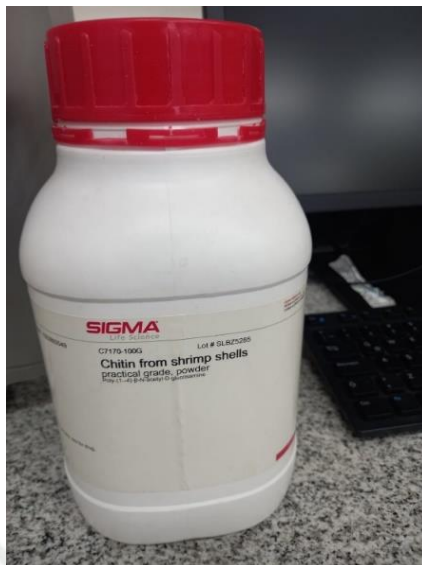


Figura 29. Quitina de la marca Sigma-Aldrich.

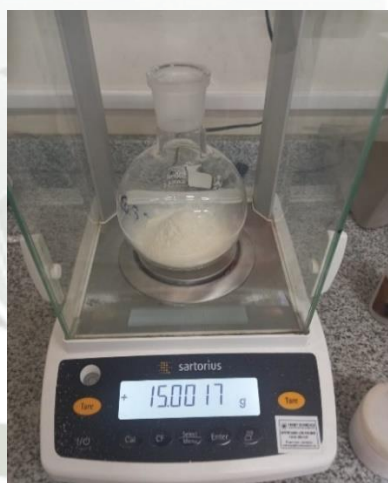


Figura 30. Pesado de la quitina comercial.



Figura 31. Sistema de condensación de reflujo.

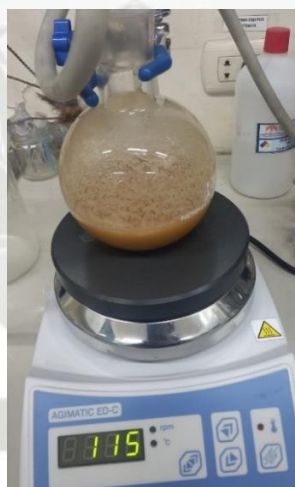


Figura 32. Proceso de desacetilación de la quitina.

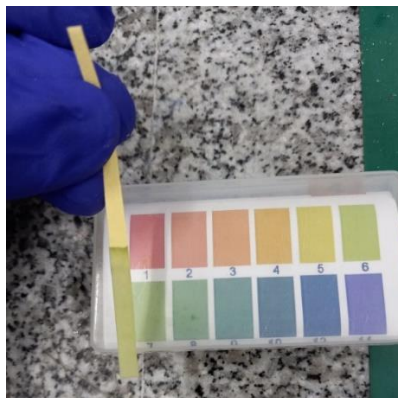


Figura 33. Ajuste a pH 7 con lavados de agua destilada.

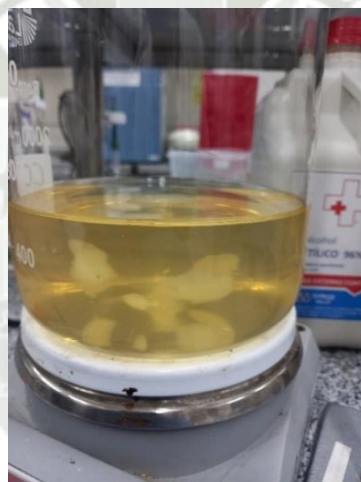


Figura 34. Quitosano disuelto en solución de ácido acético al 3%.



Figura 35. Regeneración de quitosano con NaOH 1M.

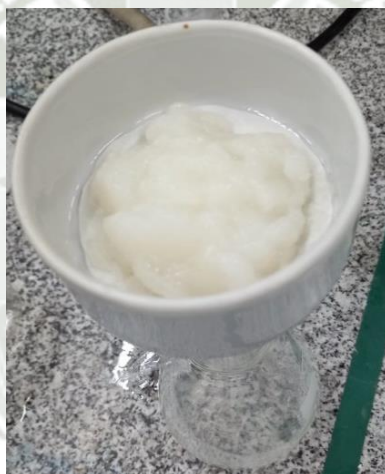


Figura 36. Lavado de quitosano con agua destilada.

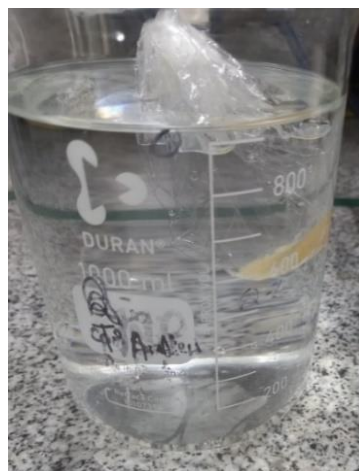


Figura 37. Diálisis de quitosano por 72 horas a 5°C.



Figura 38. Espectrómetro Nicolet™ Summit™.



Figura 39. Pastilla elaborada para el FTIR del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*).

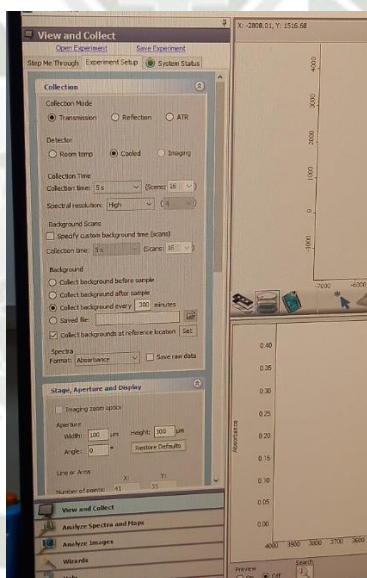


Figura 40. Interfaz del software OMINC Paradigm empleado para el FTIR del mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*).



Figura 41. Pastilla elaborada para el FTIR del quitosano.

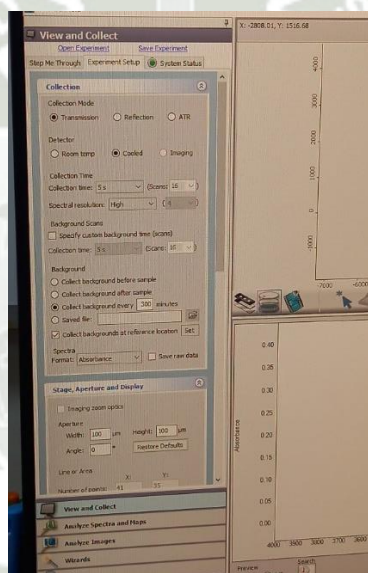


Figura 42. Interfaz del software OMNIC Paradigm empleado para el FTIR del quitosano.



Figura 43. Proceso de elaboración de las biopelículas conformadas por quitosano y mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*).



Figura 44. Lactosuero luego de las 24 horas a 4°C.



Figura 45. Proceso de desgrasado empleando la bomba a vacío.



Figura 46. Lactosuero desgrasado.



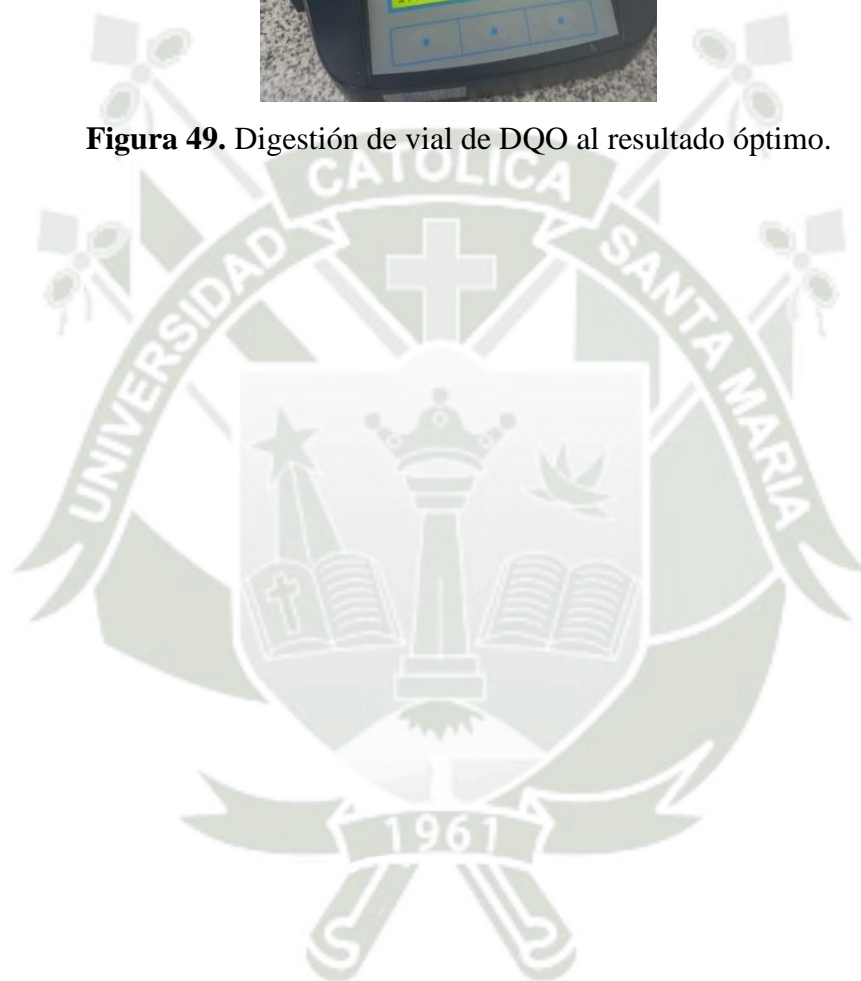
Figura 47. Dilución x10 del lactosero.



Figura 48. Pesado de 0.01g de biocoagulante.



Figura 49. Digestión de vial de DQO al resultado óptimo.



Anexo 2. Figuras de los resultados de los ensayos realizados por triplicado.



Figura 50. Primer triplicado luego de sedimentar 24 horas a 4°C.



Figura 51. Segundo triplicado luego de sedimentar 24 horas a 4°C.



Figura 52. Tercer triplicado luego de sedimentar 24 horas a 4°C.



Figura 53. Séptimo triplicado después de sedimentar 24 horas a 4°C.



Figura 54. Octavo triplicado después de sedimentar 24 horas a 4°C.



Figura 55. Noveno triplicado después de sedimentar 24 horas a 4°C.

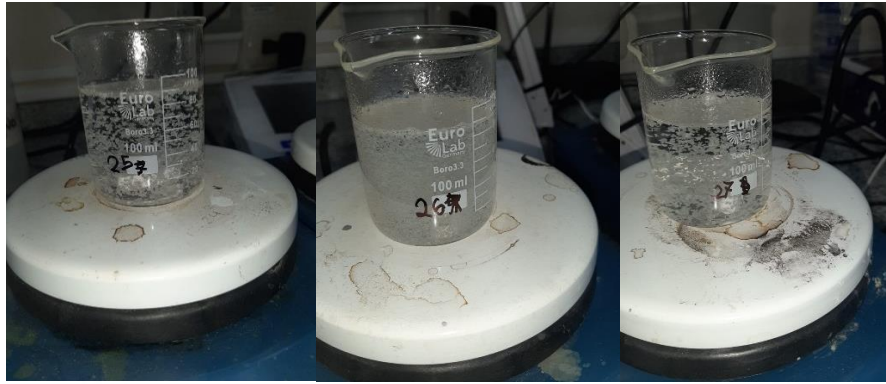


Figura 56. Noveno triplicado evidenciando la formación de grandes flóculos.

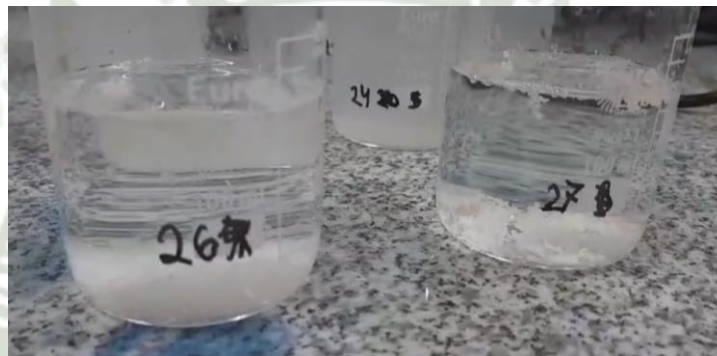


Figura 57. Sedimentación completa a los 5 minutos en el noveno triplicado.

Anexo 3: Tablas de resultados

Tabla 20. Resultados del diseño experimental empleado después del proceso de tratamiento

DISEÑO EXPERIMENTAL					RESULTADOS				
Nº corrida	Bloques	Quitosano/ Mucilago	Temperatura, °C	pH	TDS, mg/L	CND, uS/cm	pH	Turbidez ₁ , NTU	Turbidez ₂ , NTU
1	1	0.25	25	3.5	1028	2051	3.666	59.00	59.00
2		0.25	25	3.5	1090	2182	3.618	62.00	62.00
3		0.25	25	3.5	1120	2234	3.601	59.00	59.00
4	2	0.25	50	6	1755	3516	6.12	13.67	13.78
5		0.25	50	6	1480	2954	6.02	6.29	6.33
6		0.25	50	6	1639	3293	6.101	8.79	8.82
7	3	0.25	75	8.5	1354	2704	8.293	96.00	96.00
8		0.25	75	8.5	1457	2908	8.339	93.00	93.00
9		0.25	75	8.5	1330	2663	8.394	93.00	93.00
10	4	0.5	25	6	1264	2523	5.754	26.37	26.51
11		0.5	25	6	1263	2522	5.732	21.58	21.63
12		0.5	25	6	1210	2416	5.706	23.61	23.68
13	5	0.5	50	8.5	2239	4468	8.18	93.00	93.00
14		0.5	50	8.5	1715	3419	8.308	95.00	95.00
15		0.5	50	8.5	2071	4135	8.339	97.00	97.00
16	6	0.5	75	3.5	1327	2664	3.906	37.67	37.62
17		0.5	75	3.5	1236	2464	3.863	36.45	36.42
18		0.5	75	3.5	1217	2438	3.894	35.58	35.47
19	7	0.75	25	8.5	1257	2491	7.78	96.00	96.00
20		0.75	25	8.5	1234	2475	7.742	93.00	93.00
21		0.75	25	8.5	1290	2576	7.775	95.00	95.00
22	8	0.75	50	3.5	791.5	1594	3.799	22.27	22.36
23		0.75	50	3.5	872.5	1732	3.758	17.34	17.40
24		0.75	50	3.5	930.9	1877	3.758	14.46	14.55
25	9	0.75	75	6	1490	3005	6.081	4.03	4.20
26		0.75	75	6	1664	3316	6.123	4.46	4.48
27		0.75	75	6	1537	3095	6.181	3.29	3.38

Tabla 21. Promedio de los porcentajes de turbidez, desviación estándar, relación S/R y coeficiente de variación.

N° de bloques	Q/M	T, °C	pH	Promedio de remociones de turbidez	Relación S/R	Media
1	0.25	25	3.5	57.14%	-4.86120	0.5714
2	0.25	50	6	93.13%	-0.61821	0.9313
3	0.25	75	8.5	32.86%	-9.66665	0.3286
4	0.5	25	6	82.93%	-1.62577	0.8293
5	0.5	50	8.5	32.14%	-9.85908	0.3214
6	0.5	75	3.5	73.91%	-2.62594	0.7391
7	0.75	25	8.5	32.38%	-9.79446	0.3238
8	0.75	50	3.5	87.10%	-1.19964	0.8710
9	0.75	75	6	97.17%	-0.24936	0.9717

Tabla 22. Coeficientes estimados del modelo.

Término	Coef	EE del coef.	T	P
Constante	-4.5000	0.2505	-17.964	0.003
Q/M 0.25	-0.5487	0.3543	-1.549	0.262
Q/M 0.50	-0.2036	0.3543	-0.575	0.624
Temperatura 25	-0.9271	0.3543	-2.617	0.120
Temperatura 50	0.6077	0.3543	1.715	0.228
pH 3.5	1.6044	0.3543	4.529	0.045
pH 6.0	3.6689	0.3543	10.356	0.009

Tabla 23. Análisis de Varianza (ANOVA) de relaciones S/R.

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Q/M	2	2.725	2.725	1.3624	2.41	0.293
T, °C	2	3.993	3.993	1.9963	3.53	0.221
pH	2	131.531	131.531	65.7654	116.44	0.009
Error residual	2	1.130	1.130	0.5648		
Total	8	139.378				

Tabla 24. Tabla de respuesta para relaciones S/R.

Nivel	Q/M	T, °C	pH
1	-5.0487	-5.4271	-2.8956
2	-4.7036	-3.8923	-0.8311
3	-3.7478	-4.1806	-9.7734
Delta	1.3009	1.5348	8.9423
Clasificar	3	2	1

Anexos 4: Gráficas del análisis estadístico generadas por Minitab.

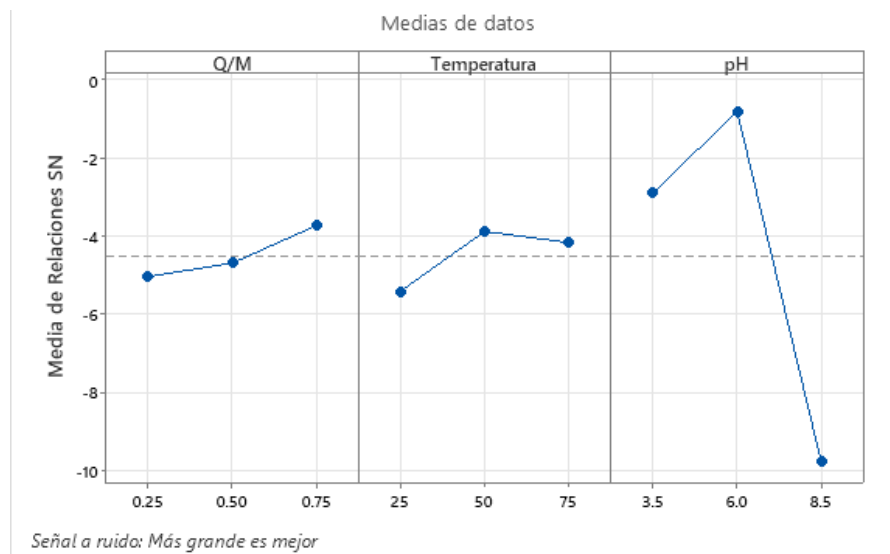


Figura 58. Gráfica de efectos principales para relaciones S/R.

Anexos 5: Cálculos realizados**Rendimiento obtenido en la extracción del mucílago de nopal**

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{63.3781\text{g}}{9129\text{g}} \times 100$$

$$\% \text{ Rendimiento} = 0.69\%$$

Cálculo empleado para determinar la concentración teórica de la solución inicial de NaOH

$$\text{Concentración final} = \frac{140\text{g}}{200\text{mL}} \times 100$$

$$\text{Concentración final} = 70.0\%$$

Cálculo empleado para determinar la cantidad teórica de moles de la solución concentrada de NaOH

$$\text{Moles de NaOH} = \frac{140\text{g}}{39.997\text{g/mol}}$$

$$\text{Moles de NaOH} = 3.5 \text{ moles}$$

Cálculo empleado para determinar la molaridad teórica de la solución concentrada de NaOH

$$\text{Molaridad} = \frac{3.5 \text{ moles}}{0.2\text{L}}$$

$$\text{Molaridad} = 17.5\text{M}$$

Cálculo empleado para determinar el volumen de alícuota a pipetear para preparar NaOH 1M a partir de la solución inicial de NaOH

$$X \times 17.5M = 100\text{mL} \times 1M$$

$$X = 5.71\text{mL}$$

Cálculo empleado para determinar el volumen de alícuota a pipetear para preparar la solución de referencia de HCl 1M

$$X \times 12.15M = 100\text{mL} \times 1M$$

$$X = 8.23\text{mL}$$

Cálculo empleado para calcular la concentración real de la solución de NaOH usada en la titulación

$$10.2\text{mL} \times X = 10\text{mL} \times 1M$$

$$X = 0.98M$$

Cálculo empleado para determinar la molaridad real de la solución madre de NaOH usada en el proceso de desacetilación de la quitina

$$5.71\text{mL} \times X = 100\text{mL} \times 0.98M$$

$$X = 17.16M$$

Cálculo empleado para determinar la cantidad real de moles presentes en la solución concentrada de NaOH

$$17.16M = \frac{\text{N}^\circ \text{ de moles}}{0.2L}$$

$$\text{N}^{\circ} \text{ de moles} = 3.432$$

Cálculo empleado para determinar el peso real de NaOH empleado para elaborar la solución concentrada

$$3.432 \text{ moles de NaOH} = \frac{\text{masa (g)}}{39.997 \text{ g/mol}}$$

$$\text{masa} = 137.27 \text{ g}$$

Cálculo empleado para determinar la concentración real de la solución inicial de NaOH

$$\text{Concentración real} = \frac{137.2 \text{ g}}{200 \text{ mL}} \times 100$$

$$\text{Concentración real} = 68.6\%$$

Rendimiento obtenido en la síntesis de quitosano

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{8.4341 \text{ g}}{15 \text{ g}} \times 100$$

$$\% \text{ Rendimiento} = 56.22\%$$

Grados de desacetilación del quitosano sintetizado

$$\% \text{ DD} = 100 - \frac{\frac{0.576}{0.588} - 0.3822}{0.03133}$$

$$\% \text{ DD} = 80.93\%$$

Cálculo realizado para determinar el valor inicial de DQO a 140 NTU

$$\frac{50\text{mg}}{\text{L}} \text{DQO} \times 100 = \frac{5000\text{mg}}{\text{L}} \text{DQO}$$

Cálculo realizado para determinar el valor de DQO del ensayo óptimo luego del proceso de biocoagulación

$$\frac{37\text{mg}}{\text{L}} \text{DQO} \times 100 = \frac{3700\text{mg}}{\text{L}} \text{DQO}$$

