

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE FLOCULANTES
NATURALES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DE LAVANDERÍA
INDUSTRIAL, UTILIZANDO EL CLADODIO DE NOPAL
(*Opuntia ficus-indica*) Y LA SEMILLA DE TAMARINDO
(*Tamarindus indica*)**

PRESENTADO POR:

OSCAR ALBERTO GUARDADO PACHECO

ALEXANDRA MICHELLE HERNÁNDEZ GARCÍA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSc. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTOR:

DRA. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE
ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Título:

**EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE FLOCULANTES
NATURALES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES PROVENIENTES DE LAVANDERÍA
INDUSTRIAL, UTILIZANDO EL CLADODIO DE NOPAL
(*Opuntia ficus-indica*) Y LA SEMILLA DE TAMARINDO
(*Tamarindus indica*)**

Presentado por:

**OSCAR ALBERTO GUARDADO PACHECO
ALEXANDRA MICHELLE HERNÁNDEZ GARCÍA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA

SAN SALVADOR, OCTUBRE DE 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos infinitamente a Dios, por permitirnos llegar a la meta y culminar nuestros estudios profesionales. Por iluminarnos en el camino hacia nuestro destino y fortalecernos en la lucha de nuestros sueños. Gracias y mil veces gracias al Creador, por darnos la oportunidad culminar una etapa más de nuestras vidas.

A nuestras familias y amigos que siempre estuvieron ahí en los momentos difíciles para brindarnos su ayuda incondicional, y esas palabras de ánimo que tanta fuerza nos brindaban.

A nuestros maestros, por haber compartido y transmitido sus conocimientos, *en especial a:*

Ing. Eugenia Gamero de Ayala por ser nuestro pilar en el desarrollo de esta investigación, en cada momento orientarnos, brindarnos su amistad y ser nuestra fiel compañera en cada etapa de nuestro desarrollo profesional.

Dra. Tania Torres Rivera, por brindarnos su ayuda incondicional y por compartir su conocimiento en el desarrollo de experimento de esta investigación.

Ing. Teodoro Ramírez, por estar pendiente del desarrollo de nuestro experimento en la Planta Piloto, por siempre brindarnos su ayuda y apreciables consejos.

DEDICATORIA

Le doy gracias a **Dios** por haberme dado todas las capacidades para poder llegar a este culmen profesional, sé que durante este largo camino el me ha guiado, me ha llevado de su mano dándome toda la fuerza y valentía para poder superar todo obstáculo. No dudo que en todo momento él puso a las personas idóneas que fueron ángeles para darme la luz en este largo camino; sé que su amor infinito me ha sostenido en cada paso y la fe que Él me ha regalado me ha permitido creer a pesar de las circunstancias. Infinitamente gracias a Dios por sé que tuvo a bien cumplir este hermoso sueño que tuve desde hace varios años.

A mi amada madre **María Luz** por ser la bendición más hermosa en mi vida, porque gracias a todas sus enseñanzas basadas en consejos, amor puro, apoyo, comprensión, correcciones, paciencia han hecho que sea lo que ahora soy, por no dudar en ningún momento de mí, no hay forma de explicar todo lo que siento en mi corazón cuando se trata de mi madre. A la **Niña Alicia** por ser la amiga más grande que he tenido, por acompañarme en mi horas de estudios, por todas esas oraciones que ella elevaba a la Virgen María en el Santo rosario para que yo pudiera salir bien en mis parciales, por ofrecerme su casa para lograr terminar mi carrera pero en especial por abrirme su corazón, de ella aprendí tanto que jamás nadie me había enseñado, la admiro tanto y le doy gracias a Dios por haberme permitido convivir durante varios años con ella.

A toda mi familia más cercana que ha formado parte de este hermosa meta, por estar pendientes de mí y consentirme en esos momentos más difíciles, por enseñarme que el amor a Dios, el esfuerzo y lucha constante nos llevaran a alcanzar siempre nuestros objetivos.

A mi amigo Oscar por todo este tiempo que hemos convivido, por ser tolerante, trabajador, por todo su apoyo sin el nada de esto se hubiera logrado, gracias por cada sacrificio, desvelo en fin gracias por todo.

A mis amigos que estuvieron apoyándome en todo momento, por cada oración que elevaron a Dios, por su amistad, paciencia, y sobre todo por amarme como soy, sé que no soy una persona fácil y por eso les agradezco por todo el amor que me han brindado, por darme siempre esos ánimos de seguir adelante, por esas visitas que en esos días grises me llenaban de alegría, risas y muchos recuerdos lindos, los amo muchísimo y sé que Dios los ha puesto en mi camino.

A mis maestros, por haber compartido y transmitido sus conocimientos, siendo nuestros consejeros y tenernos ese cariño que es correspondido, de manera especial a: Inga Eugenia Gamero, Inga Tania Torres, Inga Delmy Rico, e Ing. Teodoro Ramírez.

"Mira que te mando que te esfuerces y que seas valiente, no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo a donde quiera que vayas."

Josué 1:9

Alexandra Michelle Hernández García

DEDICATORIA

Primeramente las gracias a **Dios** por darme las fuerzas y la fortaleza necesaria para nunca desvanecer mis sueños y anhelos, por ayudarme día con día a superar todas las dificultades y permitirme llegar a esta etapa de mi vida y culminar mi carrera.

A mi madre **Mayra Pacheco**, por su gran sacrificio, porque a pesar de todas las dificultades que llegaron a nuestras vidas, ella siempre estuvo conmigo para darme una palabra de aliento. Gracias por confiar en mí y siempre decirme “tú serás lo que desees ser en tu vida”, gracias por su infinito amor, por guiarme, aconsejarme y corregirme, gracias a ella soy lo que soy.

A mi familia, en especial mi hermano **Fernando** y mi Tío **Julio**, por siempre darme sus palabras de aliento, por ser una parte fundamental en mi vida, porque a pesar de todo enseñarme que la familia siempre es lo más importante en esta vida, y que pase lo que pase siempre se puede contar con ellos.

A mi abuela **Sara Pacheco** que con mucho amor siempre me enseñó a tomar lo bueno y desechar lo malo para mi vida, gracias a sus consejos, gracias mostrarme a siempre hacer lo correcto y a dar lo mejor de mí para ayudar a las personas.

A **Josselin Pérez**, por su apoyo incondicional, por estar a mi lado en los momentos más difíciles de mi carrera, por siempre darme esos ánimos a seguir adelante y luchar por mis sueños.

A mi amiga **Michelle**, por todos sus años de amistad, por todos los momentos buenos y malos que pasamos, gracias por sus consejos y porque a pesar de todo siempre podemos contar el uno con el otro.

Oscar Alberto Guardado Pacheco

RESUMEN

El árbol de tamarindo (*Tamarindus indica*) y el Nopal (*Opuntia ficus indica*) son materias orgánicas que nos ofrecen una gran gama de usos; entre ellos, la extracción de floculantes naturales, para ser aplicados en el tratamiento de aguas residuales, produciendo lodos con menor carga contaminantes, que la que se genera de sistemas de tratamiento en el que se hecho uso de químicos.

Para que la semilla de tamarindo y el nopal sean utilizadas como materia prima en la industria química deben tomarse en cuenta sus características botánicas y morfológicas con el fin de obtener una materia prima de alta calidad.

Las plantas el árbol de tamarindo y el nopal tiene múltiples usos, en esta investigación se utilizaron sus propiedades de floculación, en el caso del tamarindo, la parte que se utilizó fue su semilla y en el nopal fue su mucílago donde ambas presentaron una excelente opción para poder extraer un floculante natural, donde estos puedan ser utilizados en la clarificación de aguas, generando así un impacto ambiental mínimo con respecto a los obtenidos químicamente, además de su rentabilidad ecológica, económica, social e industrial. Actualmente solo se utiliza la pulpa del tamarindo para extraer una bebida refrescante pero no se aprovecha todo su fruto, con respecto al nopal se utiliza para forrajes.

Durante la investigación una parte importante es la extracción de ambos floculantes con la finalidad de obtener un producto que pueda cumplir con los principios de una floculación. La semilla de tamarindo fue la base para generar el floculante, el cual se llevó a cabo a partir de un proceso conformado por el pelado de la semilla, secado, trituración, y por ultimo una maceración, extrayendo así el floculante de manera natural. Mas sin embargo la extracción del floculante del nopal involucra más tiempo debido a la cantidad de agua que contiene, para luego ser triturado, secado, extracción de pigmentos y obteniendo así un floculante en polvo de color marfil.

El parámetro a evaluar es la fracción de remoción de turbidez en aguas residuales de origen industrial, ambos se llevaron a un estudio profundo donde se obtuvieron resultados de una remoción con respecto al floculante de tamarindo de un 55.33%

y del floculante de nopal del 40.33%, basado en un estudio a nivel de laboratorio donde los datos fueron recolectados para plantear un diseño de experimentos que permita un diseño a nivel micro-empresarial, para ser operado bajo condiciones de producción óptima siguiendo los lineamientos del desarrollo sostenible y procesos productivos.

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN _____	1
CAPITULO 1 GENERALIDADES DEL ARBOL DE TAMARINDO (<i>Tamarindus indica</i>) Y DEL NOPAL (<i>Opuntia ficus indica</i>) ____	3
1.1 Descripción botánica del árbol de Tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) y del Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>). _____	3
1.1.1 Tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) _____	3
1.1.2 Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) _____	8
1.2 Ecología y Disponibilidad en El Salvador del árbol de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) y del Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>). _____	14
1.2.1 Tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) _____	14
1.2.2 Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) _____	19
1.3 Usos del árbol de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) y usos de la planta nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>). _____	22
1.3.1 Usos del árbol de Tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) _____	22
1.3.2 Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) _____	26
CAPITULO 2. PROCESOS DE EXTRACCION DE FLOCULANTES A PARTIR DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (<i>Tamarindus</i> <i>indica</i>) Y DEL CLADODIO DEL NOPAL (<i>Opuntia ficus indica</i>)	30
2.1 Método de extracción del floculante a nivel de laboratorio partir de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) _____	30
2.1.1 Otros metodos de extracción _____	32
2.2 Métodos de extracción aplicados al Cladodio de Nopal (<i>Opuntia ficus</i> <i>indica</i>). _____	36
CAPITULO 3. EXTRACCION DE LOS FLOCULANTES NATURALES A PARTIR DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (<i>Tamarindus</i> <i>indica</i>) Y DEL CLADODIO DEL NOPAL (<i>Opuntia ficus</i> <i>indica</i>) A NIVEL DEL LABORATORIO. _____	40

3.1 Metodología estándar para la toma y preservación de la muestra de agua residual _____	40
3.1.1 Ubicación del punto de muestreo _____	40
3.1.2 Tiempo y frecuencia del muestreo _____	41
3.1.3 Selección de Envases para la toma de muestras _____	41
3.1.4 Volumen de Muestra _____	42
3.1.5 Procedimiento de Recolección _____	42
3.1.6 Transporte, Preservación y Conservación de la Muestra _____	43
3.2 Selección del método de extracción de floculante _____	43
3.2.1 Descripción de equipo utilizado para algunos análisis fisicoquímicos del agua. _____	44
3.3 Extracción del floculante a partir de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus Indica</i>) _____	47
3.3.1 Descripción del método de extracción para floculante a partir de semilla de tamarindo _____	47
3.3.2 Determinación de dosis óptima y pH de operación (pruebas preliminares) _____	50
3.4 Extracción del floculante a partir del cladodio del nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) _____	57
3.4.1 Descripción del método de extracción para floculante a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>). _____	57
3.4.2 Determinación De Dosis Óptima y pH De Operación (Pruebas Preliminares) _____	60
CAPITULO 4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS _____	65
4.1 Análisis de resultados con el floculante de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>). _____	65
4.1.2 Selección de los parámetros óptimos de operación para el floculante a partir de semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) ____	74
4.1.3 Evaluación el cumplimiento de las normativas salvadoreñas del agua tratada con floculante a partir de semilla de tamarindo ____	75

4.2	Análisis de resultados con el floculante del cladodio del Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>). _____	78
4.2.1	Selección de los Parámetros Óptimos de Operación para el Floculante a Partir Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) _____	86
4.2.2	Evaluación del cumplimiento de las normativas salvadoreñas utilizando floculante a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>). _____	87
CAPITULO 5 ANÁLISIS DE BENEFICIO DE LOS FLOCULANTES NATURALES CON RESPECTO AL POLICLORURO DE ALUMINIO (PAC) _____		
5.1	Prueba floculación utilizando policloruro de aluminio (PAC) _____	90
5.2	Análisis comparativo de los floculantes naturales a partir de la semilla de tamarindo y del cladodio del nopal versus el policloruro de aluminio (PAC). _____	92
5.2.1	Análisis remoción de turbidez utilizando floculantes naturales y floculante químico (PAC) _____	93
5.3	Evaluación del proceso y la infraestructura necesaria para la aplicación de los floculantes naturales a nivel del laboratorio. _____	96
5.3.1	Detalles de operación de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) _____	96
5.3.2	Balance de masa de la extracción de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) _____	98
5.3.3	Equipos Recomendados para la Producción del Floculante a partir del Cladodio de Nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) _____	102
5.3.4	Detalles de operación del nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>). _____	105
5.3.5	Balance de masa de la extracción del mucilago del nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) _____	107
5.3.6	Equipos Recomendados para la Producción del Floculante a partir del Cladodio de Nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) _____	111
5.4	Beneficio de los floculantes naturales versus los floculantes químicos	114
5.4.1	Beneficio ambiental _____	114

5.4.2 Beneficio económico _____	114
CONCLUSIONES _____	116
RECOMENDACIONES _____	118
ANEXO 1 _____	121
ANEXO 2 _____	123
ANEXO 3 _____	125
ANEXO 4 _____	127
ANEXO 5 _____	134

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Composición química del tamarindo por 100 g de porción comestible	7
Tabla 1.2	Taxonomía de <i>Opuntia ficus indica</i>	13
Tabla 1.3	Rango de valores para características del fruto de <i>Opuntia ficus indica</i>	14
Tabla 1.4	Condiciones climáticas donde el tamarindo puede ser cultivado	17
Tabla 1.5	Aplicación y usos de <i>Opuntia ficus indica</i> y del fruto (tuna)	27
Tabla 3.1	Cronograma de muestreo	42
Tabla 3.2	Descripción de los equipos utilizados en el laboratorio.....	45
Tabla 3.3	Condiciones Iniciales de la prueba 1	50
Tabla 3.4	Resultados de la prueba 1.	51
Tabla 3.5	Condiciones Iniciales de la prueba 2	51
Tabla 3.6	Resultados de la prueba 2	51
Tabla 3.7	Condiciones Iniciales de la prueba 3	52
Tabla 3.8	Resultados de la prueba 3	52
Tabla 3.9	Condiciones Iniciales de la prueba 4	52
Tabla 3.10	Resultados de la prueba 4	53
Tabla 3.11	Resultados de la prueba 5	53
Tabla 3.12	Resultados de la prueba 5	53
Tabla 3.13	Resultados de la prueba 5	54
Tabla 3.14	Condiciones Iniciales de la prueba 6	55
Tabla 3.15	Resultados de la prueba 6	55
Tabla 3.16	Resultados de la prueba 6	56
Tabla 3.17	Condiciones Iniciales de la prueba 1	60
Tabla 3.18	Resultados de la prueba 1	61
Tabla 3.19	Resultados de la prueba 1	61

Tabla 3.20	Condiciones Iniciales de la prueba 2	62
Tabla 3.21	Resultados de la prueba 2	62
Tabla 3.22	Resultados de la prueba 2	63
Tabla 3.10	Resultados de la prueba 4	53
Tabla 4.1	Niveles de los factores experimentales y variable de respuesta	66
Tabla 4.2	Resultados obtenidos experimentalmente para el diseño factorial del tipo 3 ³	67
Tabla 4.3	Análisis de Varianza para fracción de remoción de turbidez.....	71
Tabla 4.4	Parámetros óptimos de operación para el floculante a partir de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)	74
Tabla 4.5	Comparación del agua después del tratamiento con los valores máximo permisibles según las normativas salvadoreñas.....	75
Tabla 4.6	Niveles de los factores experimentales y variable de respuesta.....	78
Tabla 4.7	Resultados obtenidos experimentalmente para el diseño factorial del tipo 3 ³	79
Tabla 4.8	Análisis de Varianza para fracción de remoción de turbidez.....	83
Tabla 4.9	Parámetros óptimos de operación para el floculante a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	86
Tabla 4.10	Comparación del agua después del tratamiento con los valores máximo permisibles según la norma NSO 13.49.01:09.....	87
Tabla 5.1	Condiciones Iniciales de la prueba con PAC	90
Tabla 5.2	Resultados utilizando el floculante PAC	91
Tabla 5.3	Resultados utilizando el floculante PAC	91
Tabla 5.4	Comparación de los parámetros evaluados con respecto a los floculantes naturales versus el policloruro de aluminio (PAC).....	92
Tabla 5.5	Comparación de fracciones de remoción de turbidez de ambos floculantes naturales.....	94

Tabla 5.6	Comparación de fracciones de remoción de turbidez de ambos floculantes naturales.....	101
Tabla 5.7	Descripción de los equipos recomendados para la extracción del floculante de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)	102
Tabla 5.8	Resumen de corrientes en el balance de masa para el floculante a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	110
Tabla 5.9	Descripción de los equipos recomendados para la extracción del floculante de cladodio del nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	111

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Hojas y foliolos de tamarindo	4
Figura 1.2	Flor y vainas de tamarindo mostrando el pistilo, estambres y semillas.....	5
Figura 1.3	Fruto de <i>Opuntia ficus indica</i> casi maduro	10
Figura 1.4	<i>Opuntia ficus indica</i> , tunera Canaria	10
Figura 1.5	El área sombreada representa el área nativa de tamarindo en África	15
Figura 1.6	Hojas y foliolos de tamarindo	16
Figura 2.1	Destilación por arrastre de vapor	33
Figura 2.2	Diagrama de extracción de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	37
Figura 2.3	Equipo tipo Soxhlet	38
Figura 2.4	Diagrama de extracción de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	39
Figura 3.1	Diagrama de flujo de la extracción de floculante de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>).....	49
Figura 3.2	Fotografía de las pruebas realizadas con el floculante de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>).....	53
Figura 3.3	Equipo Soxhlet.....	58
Figura 3.4	Diagrama de flujo de la extracción de floculante de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>	59
Figura 3.5	Fotografías de las pruebas realizadas con el floculante del cladodio de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	62
Figura 3.6	Pruebas con el floculante del nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	63
Figura 3.7	Imágenes comparativas de la aplicación de floculante de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>) en solución y en polvo.....	64
Figura 4.1a	Ajuste de pH de operación antes de la adición de floculante.....	66
Figura 4.1b	Agua después del tratamiento con floculante a partir de semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>).....	66

Figura 4.2	Agua residual trata con floculante a partir de semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>).....	68
Figura 4.3	Toma de agua residual después del tratamiento, para su análisis de turbidez	68
Figura 4.4	Fracción de remoción de turbidez utilizando floculante a partir de semilla de tamarindo	69
Figura 4.5	Reducción en los SST utilizando floculante a partir de semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>).....	70
Figura 4.6	Diagrama de Pareto estandarizado para la fracción de remoción de turbidez	72
Figura 4.7	Efectos principales para la remoción de turbidez	72
Figura 4.8	Interacción para la fracción de remoción de turbidez	73
Figura 4.9	Residuos vs valores predichos para el modelo de fracción de remoción de turbidez.....	73
Figura 4.10	Comparación de resultados con la norma NSO 13.49.01:09 utilizando floculante a partir de semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)	76
Figura 4.11	Comparación de los resultados con la norma de ANDA utilizando floculante a partir de semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)	77
Figura 4.12a	Agitación del agua en hot-plate después de agregar floculante a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	80
Figura 4.12b	Ajuste de pH de operación antes de la adición de floculante.....	80
Figura 4.13	Pruebas realizadas en el diseño de experimento utilizando floculante a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	80
Figura 4.14	Fracción de remoción de turbidez utilizando floculante a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	81
Figura 4.15	Reducción en los SST utilizando floculante a partir de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	82
Figura 4.16	Diagrama de Pareto estandarizado para la fracción de remoción de turbidez	84

Figura 4.17	Efectos principales para la remoción de turbidez	84
Figura 4.18	Interacción para fracción de remoción de turbidez	85
Figura 4.19	Residuos vs valores predichos para el modelo de fracción de remoción de turbidez.....	85
Figura 4.20	Comparación de resultados con la norma NSO 13.49.01:09 utilizando floculante a partir de cladodio de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	88
Figura 4.21	Comparación de resultados con la norma especial de ANDA utilizando floculante a partir de cladodio de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	89
Figura 5.1	Comparación de la fracción de remoción turbidez utilizando floculantes naturales vs remoción optima del PAC	95
Figura 5.2	Diagrama de bloques del proceso de producción de floculante a partir de semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)	97
Figura 5.3	Diagrama de bloques del proceso de producción de floculante a partir de cladodio de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	106

INTRODUCCIÓN

En el Salvador el mayor problema de los ríos es el alto grado de contaminación derivada de las descargas de aguas residuales sin tratamiento; se estima que las aguas residuales industriales corresponden a menos del 5% del total de vertidos, pero la falta de tratamientos adecuados y las altas concentraciones de metales pesados y metaloides agravan el problema. Sabemos que uno de los recursos más preciados del planeta es el agua, pero la superpoblación y la industrialización son la causa principal de su alta contaminación, lo que ha originado que muchas empresas se dediquen a fabricar y comercializar equipos, sistemas de purificación y tratamientos alrededor del mundo.

En el tratamiento de aguas residuales principalmente en las de origen industrial son útiles los floculantes-coagulantes ya que estos ayudan a la neutralización de la carga de los coloides generalmente electronegativos, presentes en el agua, formando un precipitado; estas son sustancias químicas que aglutinan sólidos en suspensión en el agua, provocando su precipitación, con lo que se la aclara, se eliminan turbiedades y minerales no recomendables para el consumo humano, más sin embargo estos procesos generan efectos secundarios que dañan la salud humana y de todas las especies acuíferas e incluso a los mantos acuíferos

Las empresas en los últimos años han aumentado su producción lo cual genera más contaminación y más descargas en los ríos, a pesar de los tratamientos que las empresas aplican siempre hay un índice de contaminación de químicos que no permite que los ríos se potabilicen al 100%.

En las últimas décadas la preocupación sobre la contaminación ambiental en el planeta ha sido trascendental ya que el mundo entero está tomando las medidas para disminuir el calentamiento global y las consecuencias del cambio climático, es por ello que se están realizando muchos productos biodegradables, que sean amigables con el medio ambiente.

En el ámbito de los floculantes-coagulantes se han investigado y aplicado muchas alternativas de origen natural, con el cual puedan cumplir su función principal que es sedimentar aquellos sólidos disueltos suspendidos y a la vez ser biodegradables, es por ello que en este trabajo se realizará una investigación evaluando la efectividad de la aplicación de dos floculantes naturales a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) y del cladodio del nopal (*Opuntia ficus indica*); evaluando los beneficios que pueden generar al ser utilizados en el tratamiento de aguas residuales, entre los que se encuentran la baja toxicidad del efluente y los lodos generados, alta biodegradabilidad de los lodos y de las sustancias naturales que permanecen en el efluente, disminución de costos de adquisición y aprovechamiento de recursos.

CAPITULO 1. GENERALIDADES DEL ARBOL DE TAMARINDO (*Tamarindus indica*) Y DEL NOPAL (*Opuntia ficus indica*)

1.1 Descripción botánica del árbol de tamarindo (*Tamarindus indica*) y del nopal (*Opuntia ficus indica*).

1.1.1 Tamarindo (*Tamarindus indica*)

Tamarindus indica es un árbol de gran tamaño, larga vida y usualmente siempre verde, nativo a los trópicos del Viejo Mundo. Conocido comúnmente como tamarindo, este árbol se ha plantado y naturalizado extensamente en las regiones tropicales y subtropicales, incluyendo la región del Caribe, la América Central y el norte de la América del Sur.

El tamarindo pertenece a la familia Leguminosae (*Leguminosae*) que es la tercera familia más grande de plantas, después de las compuestas (*Asteraceae*) y las orquídeas (*Orchidaceae*), con un total de 727 géneros reconocida y el número de especies estimado en 19,327. Pertenece a la subfamilia *Caesalpinioideae*, y a la tribu *Detarieae*, y género *Tamarindus* el cual es monotípico que contiene a una única especie la cual es Indica.

Su etimología se deriva de del árabe (*tamar hindi*) que significa “dátil de la India”, esto debido a que llegaba a la Península Arábiga en los navíos del Océano Indico; *Indica*, del griego (*indikus*) “procedente de las indias orientales”.

➤ MORFOLOGÍA VEGETATIVA

El tamarindo es un árbol de larga vida, grande, el cual siempre está verde, de 20-30 m de altura con un tronco grueso de hasta 1.5-2 m de diámetro. El tronco se bifurca a aproximadamente 1 m sobre el suelo, y a menudo es de tronco múltiple con ramas muy extendidas, inclinadas en los extremos y frecuentemente torcidas, pero formando una corona redondeada que se extiende. La corteza es gris pardo, áspero y escamoso. Una goma de color rojo oscuro exuda desde el tronco y las ramas cuando están dañados.

El tamarindo produce una raíz profunda y un extenso sistema de raíces laterales, pero las raíces pueden verse atrofiadas en suelos mal drenados o compactados. Las hojas son pinnadas, de longitud (5-) 7-12 (-15) cm; en la base de la hoja un pulvino, un peciolo de 1.5 cm y con folíolos que están en 6-10 pares por hoja, cada uno estrechamente oblongo, redondeado en el ápice y asimétrico con un mechón de pelos amarillos.

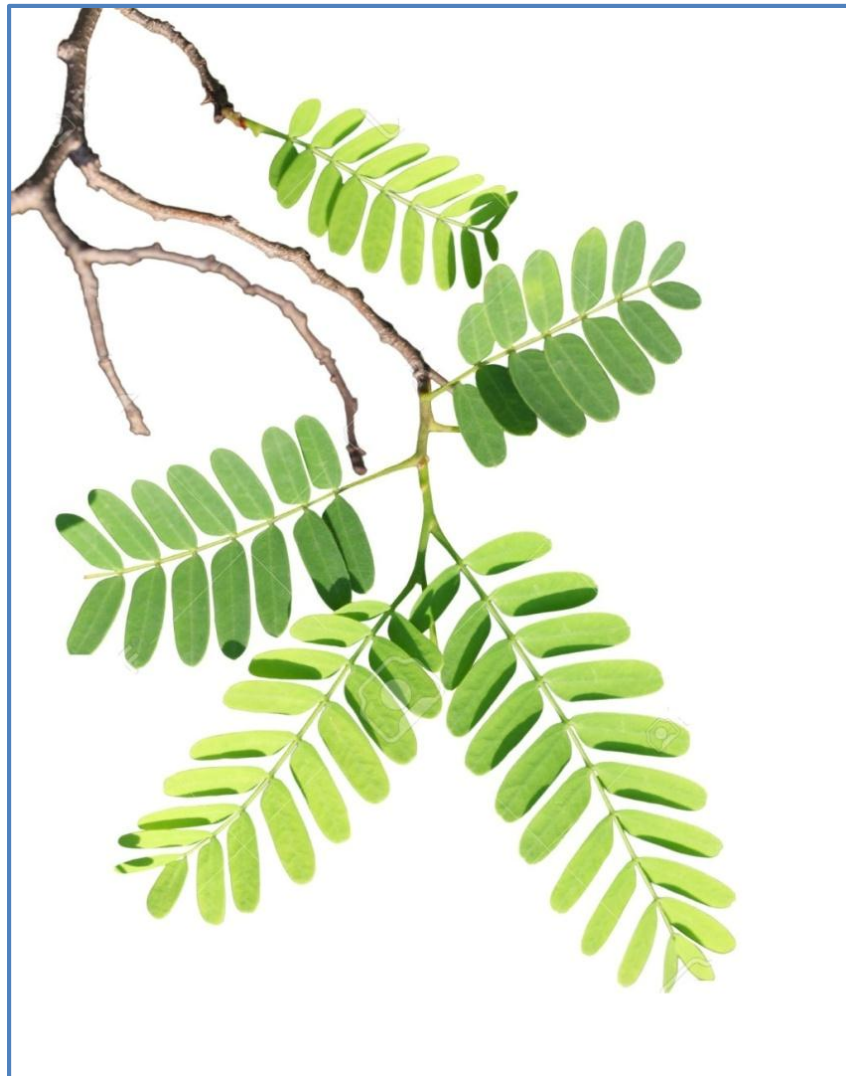


Figura 1.1 Hojas y folíolos de tamarindo.

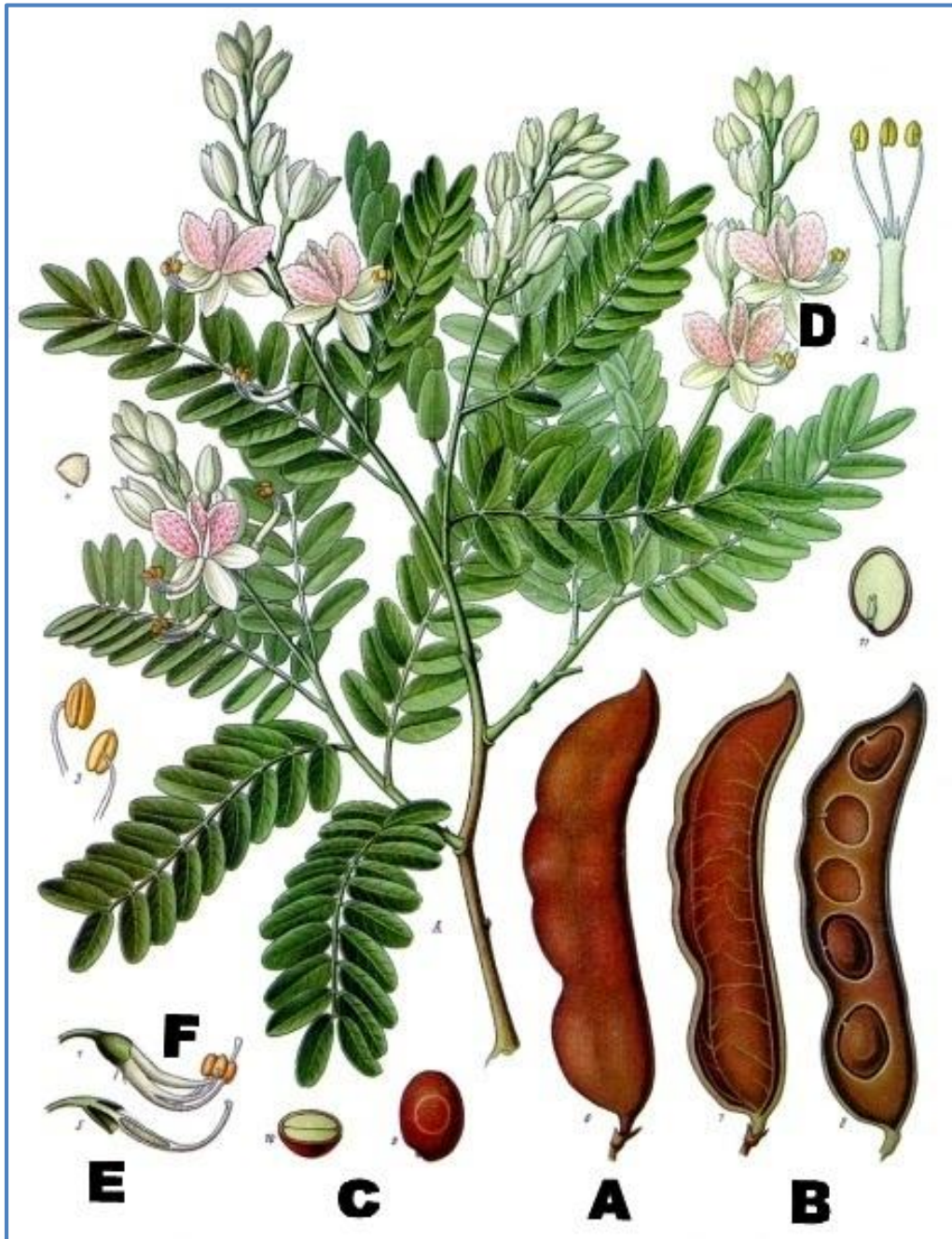


Figura 1.2 Flor y vainas de tamarindo mostrando el pistilo, estambres y semilla
 A-fruto maduro. B- Sección vertical a través de una sola vaina / fruta para mostrar la
 disposición de semillas. C- semillas. D- Flor. E- Detalles de pistilo y estigma. F- Detalle
 del tubo de la corola, pistilo y estambres

Las flores son irregulares 1.5 cm de largo y 2-2.5 cm en el diámetro, cada uno con un pedicelo aproximadamente 5-10 mm de largo. Las brácteas son ovales-oblongas, cada bráctea casi tan largo como el brote de la flor. Hay 2 bractéolas, en forma de barco, de 8 mm de largo y rojizos. El cáliz (8-15 mm) de tubo espiral estrecho y 4 sépalos, mientras los pétalos, amarillos con rayas naranjas a rojas, vienen en 2 labios desiguales: el superior con 3 pétalos bien desarrollados y los 2 inferiores muy reducidos. Las flores son bisexuales, el color de las flores es el mismo en cada árbol; no se mezclan. Los estambres son 3 (-5) fértiles y mínimo 4 estériles. Las flores son entomófilas y en gran parte polinizadas. Las flores son nectaríferas, el néctar que es producido por los pelos en la base del ovario, y también se produce auto polinización.

Los frutos son vainas 5–16 cm de largo x 2 cm de ancho, oblongos, curvos o rectos, con extremos redondeados y un poco comprimidos. La vaina tiene un epicarpio externo que es gris claro o marrón y escamoso, dentro se encuentra la pulpa firme pero blanda que es gruesa y marrón negruzco. La pulpa es atravesada por cavidades de semilla formadas. Cada vaina contiene 1-12 semillas que son aplanadas, brillantes, orbiculares a romboides, cada 3-10 x 1.3 cm y el centro de cada lado de la semilla es plano, marcado con una depresión central grande. Las semillas son duras y de color rojo a marrón morado. Las vainas maduran unos 10 meses después de la floración y pueden permanecer en el árbol hasta el próximo período de floración, a menos que se cosechen.

➤ **COMPOSICIÓN DEL TAMARINDO**

La pulpa de la fruta que comprende casi la mitad del peso de la vaina es fuente de vitaminas (ácido ascórbico, riboflavina, niacina), 100 gramos de fruto maduro contienen 267 calorías, 62.7 gramos de carbohidratos, 2.8 gramos de proteína y 0.6 gramos de grasa e importantes minerales como calcio, fósforo y hierro, con un contenido de humedad del 20%. La acidez de la pulpa se debe a la presencia del ácido tártrico cuya concentración es del 10 a 15%, además contiene ácido acético, cítrico, málico, succínico, así como pectina.

La composición del fruto de tamarindo básicamente está dada por aproximadamente 20% de cáscara, 40% de pulpa y 40% restante compuesto por la semilla. Sin embargo valores más exactos se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 1.1 Composición química del tamarindo por 100 g de porción comestible.

Compuesto	Fruto de tamarindo	Pulpa de tamarindo
Agua (%)	12.6 - 34.2	28.0 – 42
Proteína (%)	1.4 - 3.3	1.0 – 1.5
Lípidos (%)	0.6 - 1.0	0.4 – 0.8
Carbohidratos	59.7 - 71.8	27.0 – 48.0
Cenizas (%)	1.5 - 4.5	1.0 – 3.5
Fibra (%) Pectina (%)	3.0 - 5.0	2.0 – 2.6
Celulosa (%)	3.0 - 4.0	2.0 – 4.0

Fuente: Saavedra, Mario. (2016)

El tamarindo es de las frutas tropicales con los niveles más bajos de agua y probablemente como una consecuencia tienen los niveles más altos de proteína, carbohidratos y minerales que ninguna otra fruta. Sin embargo, la característica más sobresaliente del tamarindo es su elevado valor de acidez expresado como ácido tartárico, el cual no es común en las frutas tropicales. Aunque existen otras frutas con contenido de ácido tartárico tales como uva, toronja y frambuesa, estas no presentan tan elevados niveles como el Tamarindo. Otra característica importante es su alto contenido de azúcares, siendo la segunda de mayor contenido de azúcares totales entre las frutas, el total de azúcares y azúcares reductores en el tamarindo son de 31 y 23% respectivamente.

Cerca de la mitad del ácido tartárico presente en el tamarindo se encuentra como bitartrato de potasio (también conocido como crémor tártaro) y en menor proporción compuesto por tártaro de calcio; además del ácido tartárico, el Tamarindo cuenta con otros ácidos orgánicos aunque en mucho menor proporción entre los que figuran los ácidos málico, oxálico y acético; es una fruta con

contenidos bajos de vitaminas C y A. Los niveles de vitamina C o ácido ascórbico difieren con la variedad y las características de crecimiento y pos cosecha de la fruta que oscilan entre 2 y 20 mg/100g.

La acidez de la pulpa (11.32%) se debe a la presencia del ácido tartárico que es el mayor contenido cuyo porcentaje es del 90% de la acidez total del tamarindo, siendo el cítrico el segundo en cantidad con el 5% y el resto de la acidez de la fruta son de cantidades menores de ácido ascórbico, ácido acético y ácido tánico, dándole un interés especial a la fruta debido a que contiene una gran cantidad de ácidos orgánicos, que junto con el alto porcentaje de azúcares muestran una relación que no se da en ninguna otra fruta.

Las semillas se utilizan como alimento, su contenido proporciona almidón, proteína y aceite, su composición química comprende: agua 11.3%, proteína 13.3%, grasa 5.4%, carbohidratos 57.1%, ceniza 4.1% y fibra cruda 8.8%. La proteína de la semilla es rica en ácido glutámico 18%, ácido aspártico 11.6%, glicina 9.1% y leucina 8.2% (Saavedra, M. 2016), los dos primeros serían los responsables de la coagulación. (Guardián, R., Coto, J. 2011)

1.1.2 Nopal (*Opuntia ficus indica*)

➤ ORIGEN

Opuntia ficus-indica, comúnmente conocida como higuera (de pala), palera, tuna, nopal, etc. Es una especie de planta arbustiva del género *Opuntia* de la familia de las cactáceas. Es entre las cactáceas, la de mayor importancia agronómica, tanto por sus sabrosos frutos como por sus tallos que sirven de forraje o pueden ser consumidos como verdura, la mayoría de los miembros de este género carece de hojas nomófilas, los segmentos o cladodios en que se divide, son tallos capaces de ramificarse, emitiendo flores y frutos. Estos tallos son planos, ovales y de color verde medio, poseen dos clases de espinas, reunidas en los gloquidios (especie de cojincillos) de las areolas, unas largas y duras, y otras cortas y finas con aspecto veloso, conocidas como “penepes” en la zona cordillerana de Argentina.

El mejoramiento genético que ha sufrido se remonta a la época prehispánica; los cronistas de indias ya relatan sobre estas plantas y sus frutos, que fueron llevadas a España posiblemente en el primer o segundo viaje de Colón a América, aunque el primer registro cierto es para México, en 1515 (según la crónica de Fernández de Oviedo de 1535, reproducida en López Piñero, 1992). En su forma sin espinas, esta especie es una forma hortícola, no se encuentra silvestre.

La variedad cultivada (sin espinas) de esta especie fue introducida en España, posiblemente pocos años después del descubrimiento de América (1500 d.C.). En un principio se cultivó como curiosidad, en los jardines de la nobleza. Más adelante se divulgó en las zonas cálidas de España, Italia, etc. De allí se llevó a otros países del Mediterráneo y posteriormente a Sudamérica, Sudáfrica, Australia, India, etc. Básicamente su propagación se debió a los navegantes, que lo llevaban como verdura fresca por su contenido en vitamina C.

Las flores, en forma de corona, nacen de las areolas en los bordes de los segmentos. Florece una vez al año y tanto el fruto como la flor pueden ser de diversos colores, desde el amarillo al rojo, el fruto maduro es una baya de forma ovalada con diámetros de entre 5,5 y 7 cm, una longitud de 5 cm a 11 cm y un peso variable entre 43 y 220 g, contiene una cáscara gruesa, espinosa, y con una pulpa abundante en pepas o semillas.

Los segmentos frescos de este cactus contienen alrededor de un 90 % de agua, los frutos un 12 % de azúcar y 6,75 % de materias nitrogenadas, además de ácidos orgánicos (alrededor del 0,10 %), con un característico colorante entre rojo y anaranjado, lo que provoca que, al consumirlo, la orina se tiña de ese color.



Figura 1.3 Fruto de *Opuntia ficus-indica* casi maduro



Figura 1.4 *Opuntia ficus-indica*, Tunera Canaria

➤ **NOMBRES COMÚNES**

Algunos nombres comunes son muy ilustrativos acerca de su origen y distribución, el nombre “tuna” es de origen caribeño, tomado por los primeros españoles que conocieron estas plantas. Más exactamente es un vocablo Taíno. Con éste término se designa mayormente a los frutos, aunque también se utiliza para la parte vegetativa de las especies de *Opuntia*. Lo extendido de este nombre sugiere que fue el primero conocido por los españoles, aún antes que los nombres mexicanos. “Nopal” es un término mexicano derivado del Náhuatl "Nopalli" (Bravo, 1991: 558; Moringo: 424), con el que se designa a varias especies. El primer nombre español es “Higo de las Indias”, que alude a su origen, las "Nuevas Indias" y de allí su primer nombre científico: *Cactus ficus-indica*. (Kiesling, R. Origen, Domesticación y Distribución de *Opuntia ficus-indica*).

El nombre ficus-indica había sido usado en "frases diagnósticas" ya mucho antes de Linné, para designar varias especies. Otro nombre, ampliamente distribuido, es "Tuna de Castilla"; (o Nopal de Castilla) que personalmente interpreto como que Castilla fue el primer centro europeo de diseminación de esta planta (Andalucía, según Le Houérou, 1996). Al retirarse de España, los moros llevaron esta especie al norte de África, llamándola "Higo de los cristianos". Actualmente en Marruecos es sumamente frecuente la forma espinosa y escasa la forma inerme; su nombre es "Tapia", ilustrativo de su utilidad como cerco . Su amplia difusión en la cuenca del Mediterráneo puede apreciarse por el término "Sabra", que en Israel designa tanto al poblador nativo como a esta especie, como también por la ilustración de esta especie en sellos postales de varios países que rodean el mar Mediterráneo.

La forma cultivada fue llevada en 1769 a California por misioneros Franciscanos, provenientes de México, llamándosela hasta hoy "mission cactus" (Benson & Walkington, 1965). En el nor-este del Brasil su mayor utilidad es como forraje, suministrado durante todo el año, lo que se expresa claramente por su nombre local "palma forrageira". Su introducción en ese país no está registrada con exactitud (Domingues, 1963). Su cultivo es muy importante en esa zona, como se pudo verificar recientemente en el oeste del Estado de Pernambuco.

➤ **OTROS NOMBRES**

En México: la planta se llama nopal, y el fruto tuna (si es dulce) o xoconostle (si es agrio); en el Perú: tuna; en Bolivia: la planta se llama penco, y el fruto tuna; en Chile: tuna. En Argentina: tuna; en Paraguay: tuna; en Uruguay: higo de tuna; en Colombia: higo tuna. En Ecuador: tuna; en Venezuela: tuna; en España: higo de pala e higo chumbo. En quechua, hay variedades de tuna que se conocen como huaquru, mancaullu, paullunchu.

➤ **TAXONOMÍA**

El nopal pertenece a la familia Cactaceae comúnmente conocidas como cactáceas o cactus. Las cactáceas son plantas que caracterizan los paisajes mexicanos, se distribuyen principalmente en las zonas áridas aunque una gran diversidad de especies se encuentra en las zonas tropicales, subtropicales y templadas.

En México se encuentra el mayor número de géneros y especies de toda América, vale la pena mencionar que de las 1600 especies que forman esta familia, en México habitan 1088.

En México se le llama nopal a varias especies del género "Opuntia" de la familia "Cactaceae". En el libro Cactáceas de México de Helia Bravo (1978) para los nopales presentan 2 géneros Opuntia y Nopalea. El género Opuntia en México presenta 5 subgéneros, 17 series y 104 especies. El género Nopalea presenta 10 especies de las cuáles la "Nopalea Cochenillifera" se utiliza como Nopal Verdura. En resumen de las 104 especies de Opuntia y 10 de Nopalea se utilizan para forraje 15 especies, 5 para fruta y 3 para Verdura (2 de Opuntia y una de Nopalea.) (Ríos Ramos Juan, M. Quintana Verónica, 2004)

Opuntia ficus-indica fue descrita primero por Carlos Linneo en Species Plantarum, vol. 1, p. 468 en 1753 como Cactus ficus-indica y atribuida al género nuevo Opuntia y publicada en The Gardeners Dictionary, ed. 8, nº2, por Philip Miller en 1768.

➤ **SUBFAMILIAS**

La familia Cactaceae se divide en cuatro subfamilias: Pereskioideae (monogénica; especies provistas de hojas bien formadas), Opuntioideae (a la que pertenece la chumbera o nopal), Maihuenioideae (monogénica; especies restringidas a Argentina y Chile) y Cactoideae (la de mayor número de especies).

➤ **ETIMOLOGÍA**

Opuntia: nombre genérico que proviene del griego usado por Plinio el Viejo para una planta que creció alrededor de la ciudad de Opus en Grecia.

Ficus-indica: compuesto por ficus, la higuera, y el epíteto neológico latino indica que significa "de la India", entendido como Indias Occidentales (West Indies). O sea, higuera de la India.

Tabla 1.2 Taxonomía de *Opuntia ficus-indica*

Reino	Vegetal
Subreino	Embriofita
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledonea
Subclase	Dialipetalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntiae
Genero	Opuntia

Fuente: Manejo general del cultivo del nopal (2004)

➤ **VARIEDADES DEL NOPAL**

El género *Opuntia* presenta cinco subgéneros, diecisiete series y 104 especies como se muestra a continuación:

- ✓ Subgénero *Cylindropuntia* presenta ocho series y 29 especies, de las cuales sólo tres se utilizan como forraje; *Opuntia fulgida*, *Opuntia cholla* y *Opuntia imbricata*.
- ✓ Subgénero *Grusonia* que presenta una sola especie
- ✓ Subgénero *Corynopuntia* con ocho especies.
- ✓ Subgénero *Opuntia* que presenta 17 series y 63 especies de las cuales se utilizan para forraje *Opuntia decumbens*, *Opuntia microdacys*, *Opuntia rastrera*, *Opuntia azurea*, *Opuntia lindheimeri*, *Opuntia cantabrigiensis*, *Opuntia duranguensis*, *Opuntia leucotricha*, *Opuntia robusta*, *Opuntia Stenopétala*, *Opuntia violacea*, *Opuntia phaecantha*, y *Opuntia pailana*.
- ✓ Se utilizan por su fruta cinco especies: *Opuntia hyptiacantha*, *Opuntia streptacantha*, *Opuntia megacantha*, *Opuntia xoconostle* y *Opuntia ficus-indica* y como nopal de verdura se utiliza *Opuntia robusta*.

- ✓ Subgénero *Stenopuntia* con tres especies de las cuales, dos se utilizan para forraje: *Opuntia stenopétala* y *Opuntia grandis*
- ✓ El género *Nopalea* presenta 10 especies, de las cuales probablemente sólo una, *Nopalea cochenillifera* se utiliza como nopal verdura.
- ✓ De las 104 especies de *Opuntia* y 10 de *Nopalea*, se utilizan para forraje 15 especies, por su fruta 5 y como verdura, 3 (dos de *Opuntia* y una de *Nopalea*).

La tuna como fruta presenta diferentes características dependiendo de la subespecie a la cual se esté refiriendo; en general se puede decir que las variedades comercializadas se encuentran dentro de los parámetros que se presentan en la tabla a continuación.

Tabla 1.3 Rango de valores para características del fruto de *Opuntia ficus indica*

Características	Rango de Valores
Peso total	40-190g
Peso de cascara	14-100g
Peso de pulpa	45-130g
Peso total de semillas	65-48g
Diámetro de semillas	0.1-0.5 cm
Longitud del fruto	6.0-10.0cm
Diámetro del fruto	3.5-6.5 cm
Sólidos solubles pulpa	10.0-17.0 B

Fuente: Evaluación las Características Nutricionales y Fisicoquímicas del Jugo del Fruto de *Opuntia ficus-Indica* (2011).

1.2 Ecología y disponibilidad en El Salvador del árbol de tamarindo (*Tamarindus indica*) y del nopal (*Opuntia ficus indica*).

1.2.1 Tamarindo (*Tamarindus indica*)

Se han propuesto varias áreas geográficas para el origen del tamarindo entre las que destacan India, el Lejano Oriente o África, pero el consenso actual es que es

África. Actualmente se considera que el árbol de tamarindo es nativo a las sabanas secas del África tropical, desde el Sudán, Etiopía, Kenia y Tanzania, hacia el oeste a través del África sub-Sahariana hasta Senegal. El árbol fue introducido a Egipto, el Medio Oriente y Asia por comerciantes árabes en tiempos antiguos, y al Trópico del Nuevo Mundo en tiempos más recientes, probablemente durante los primeros años del comercio de esclavos procedentes del oeste de África.

Hoy en día se cultiva a nivel pantropical y se ha naturalizado en muchas localidades, particularmente en el sur de Asia.

En Puerto Rico es común encontrarlo a lo largo de caminos y carreteras, alrededor de viviendas y en laderas en las regiones costeras secas.



Figura 1.5 El área sombreada representa el área nativa de tamarindo en África.
Fuente: K. El-Siddeg, H. P. M. Gunesana (2006)

➤ DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

Se estima que la primera referencia al tamarindo en las Américas es de Acapulco (México) en 1615, lo que sugiere que puede haber llegado de Asia a través del Pacífico. De México, el tamarindo fue introducido probablemente a través de América tropical y las islas del Caribe. Las fechas de introducción son desconocidas, sin embargo, se cree que se produjo en Hawái en 1797, donde persiste hoy en día un pequeño número de estos árboles a través de las islas. El tamarindo también se encuentra creciendo en las islas del Caribe, incluyendo Jamaica, Cuba, las Antillas Mayores y Menores y la República Dominicana, es común a lo largo de los caminos, alrededor de casas, en laderas y en regiones costeras secas .

En Puerto Rico tamarindo se cultiva comercialmente, la producción anual es de aproximadamente 23 toneladas para 1980. También hay plantaciones comerciales en Brasil y otros países latinoamericanos.



Figura 1.6 Áreas donde el tamarindo ha sido introducido y áreas donde es nativo.
Fuente: K. El-Siddeg, H. P. M. Gunesana (2006)

El tamarindo se adapta a una amplia gama de condiciones ecológicas, lo que refleja su amplia distribución geográfica en los trópicos sub y semiáridos. Crece

silvestre en muchos países y también es ampliamente cultivada. Se desarrolla en las mismas condiciones que el árbol de baobab, ya menudo crece cerca de aldeas, aunque rara vez se encuentra creciendo cerca de otras especies. El árbol tiene una abundante caída de las hojas. Y aunque se planta a menudo para su sombra agradable en aldeas, la gente en la India se opone a dormir debajo del árbol, pues temen las "exhalaciones ácidos nocivos".

➤ **CONDICIONES CLIMATICAS PARA EL DESARROLLO DEL TAMARINDO (*Tamarindus indica*)**

En la tabla que esta continuación se presentan las características de las condiciones climáticas en donde se puede cultivar el tamarindo:

Tabla 1.4 Condiciones climáticas donde el tamarindo puede ser cultivado.

Condición o factor climático	Descripción
Clima	El tamarindo crece bien con una precipitación media anual uniformemente distribuida de 500 a 1500 mm (el requisito mínimo de lluvia es de 250 mm). La máxima precipitación anual que tolera el tamarindo es de hasta 4000 mm, siempre y cuando el suelo esté bien drenado, el tamarindo crece bajo estas condiciones en los trópicos húmedos pero no florece. De hecho, el tiempo seco es importante para la iniciación de las flores y si las lluvias abundan durante la floración el tamarindo no da frutos. Así, en los trópicos húmedos del noroeste de la India y el sur de Malasia, los árboles crecen bien pero no producen ninguna fruta.

continúa

continuación

Tabla 1.4 Condiciones climáticas donde el tamarindo puede ser cultivado

Condición o factor climático	Descripción
Clima	El tiempo seco es muy importante para el desarrollo de los frutos, e independientemente de la precipitación anual total, el tamarindo produce más fruta cuando se somete a un período seco anual bastante largo. El tamarindo se puede cultivar en áreas muy secas con riego suplementario y puede soportar hasta seis meses sin precipitaciones, esto se puede observar en las zonas secas norte y sur de Sri Lanka, donde hay una estación seca prolongada de más de 4-6 meses.
Temperatura	Esencialmente un árbol de climas tropicales, el tamarindo prospera bajo una temperatura máxima anual de 37 °C a un mínimo de 9.5 °C.. Los árboles más antiguos son más resistentes a temperaturas extremas que los árboles jóvenes y pueden soportar temperaturas tan altas como 47°C y tan bajas como -3°C sin lesiones graves.
Viento	Es muy resistente a los fuertes vientos y puede tolerar tifones violentos y ciclones, a menudo conocido como el árbol resistente a los huracanes, tiene ramas fuertes y flexibles, y un sistema de raíces profundo y extenso, que lo ancla al suelo.

continúa

continuación

Tabla 1. 4 Condiciones climáticas donde el tamarindo puede ser cultivado

Condición o factor climático	Descripción
Luz	El tamarindo es un árbol exigente de luz y crece muy lentamente, a menudo se aísla de otra vegetación y el suelo suele estar desnudo alrededor del árbol debido en parte al denso sombreado por el dosel.
Altitud	Se ha reportado que el tamarindo crece a desde de 0 hasta 2000 m sobre el nivel del mar; la falta de tamarindo que crece en altitudes más altas se asocia más con la disminución de temperatura que con la altitud misma. En Yunan, China, consideraron el tamarindo adecuado para 1400m al plantar una gama de árboles para la forestación entre 1400-1600m sobre el nivel del mar.
Suelo	El tamarindo se desarrolla mejor en suelos limosos, profundos, bien drenados, que favorecen el desarrollo de una raíz larga. Sin embargo, los arboles más viejos son más resistentes a la salinidad.

1.2.2 Nopal (*Opuntia ficus indica*)

Esta especie se cultiva, entre otros lugares, en México, Perú, Colombia, España, Sicilia, las costas del sur de Italia, Marruecos, Argelia, Egipto, Israel, Arabia Saudita, Brasil, Chile, el norte de África, así como en Eritrea y en Etiopía, donde la fruta es llamada beles. Rústica y espinosa, esta planta es también característica del norte argentino, extendiéndose hasta la zona árida de Córdoba. Se da en

parajes áridos, secos, donde normalmente no habita ningún cultivo. El cultivo de la tuna como árbol en este país no se explota económicamente, encontrándose casualmente, y siendo considerada una planta silvestre. Es costumbre su consumo por parte de la población local, ingiriéndose preferentemente fresco o también procesado en forma de un dulce regional llamado arrope, se denomina tunal o nopalera al sitio donde abunda dicha planta. Las Opuntias se han adaptado perfectamente a zonas áridas caracterizadas por condiciones secas, lluvias erráticas y suelos pobres expuestos a la erosión. Algunas especies son inclusive consideradas como plantas naturalizadas en países como Sudáfrica y Australia, donde las condiciones ambientales son particularmente favorables (Reynolds y Arias-Jiménez, 2003).

En las zonas áridas y semiáridas existen diferentes factores ambientales que limitan el crecimiento de las plantas, tales como temperaturas altas y bajas, escasez de agua y limitación en la disponibilidad de nutrientes. La evolución de las Cactáceas en estos ambientes ha conducido a que las diferentes especies del género opuntia desarrollen características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas que les permitan adaptarse a estas condiciones ambientales adversas.

La proliferación masiva de ciertos tejidos parenquimatosos, asociados con un aumento en el tamaño de las vacuolas y una disminución en los espacios intercelulares, le permite a la planta acumular agua en breves períodos de humedad. Por otra parte, las formas esféricas o suculentas representan cuerpos más eficientes para evitar la evapotranspiración.

Los suelos de origen calcáreo, textura franca, franco arcilloso arenosa, arena franca, franco arenoso, profundidad de 10- 15 cm., pH 6.5 – 8.5. Los mejores suelos para las plantaciones de nopal son los de origen ígneo o calcáreo con textura arenosa, profundidad media y con un pH neutro o de preferencia alcalino, las altitudes que varían entre los 800 y 2.500 m.s.n.m., aunque también pueden encontrarse a altitudes menores cerca de la costa. El suelo deberá tener buena fertilidad natural y al menos 30 cm de profundidad para garantizar un buen vigor

de las plantas. Aunque el cultivo de nopal es tolerante a la falta de agua, si se pretende establecer una plantación de nopal para la producción de verdura deberá ser accesible y cercano a una fuente de agua, con el fin de proporcionarle el manejo adecuado a la plantación, y obtener mejores rendimientos. Si el cultivo es para forraje y fruto, la producción depende de la cantidad y calidad del riego.

En cuanto a las condiciones climáticas requeridas para su desarrollo, es necesaria una temperatura media anual de 16-28° C, aunque existen algunas especies resistentes a las bajas temperaturas que pueden soportar hasta -16 °C, siempre y cuando no se presenten por períodos prolongados; una precipitación pluvial media anual de 150-1800 mm, la altitud tiene un margen de 800- 1800 msnm. En general, los rangos mencionados se refieren a condiciones óptimas de desarrollo del nopal, sin embargo, el nopal prolifera, fuera de estas características, aunque los excesos de humedad pueden provocar enfermedades fungosas y daños por insectos. Por lo anterior el clima de El Salvador resulta factible para el desarrollo de esta planta en la mayoría de sus zonas en cuanto a condiciones de humedad y temperatura se refieren, (ver anexo 1 y anexo 2).

➤ **ZONAS DE PRODUCCIÓN DEL NOPAL**

Un aspecto importante de la producción del nopal es que casi todas las plantaciones, tanto para producir tuna (fruto del nopal) como planta en sí, se encuentran localizadas en áreas marginales caracterizadas por suelos pobres y/o climas áridos o semiáridos, de manera que los cultivos básicos casi nunca se logran en estas áreas, por lo que el nopal resulta una excelente alternativa. Especialmente en los agostaderos del norte de México, caracterizados por climas con alta variación diaria y anual de la temperatura. Por estas razones, *Opuntia ficus-indica* es una planta fácilmente adaptable en climas con una escasa y errática precipitación pluvial, por lo que no existe a nivel mundial mejor planta para controlar la erosión eólica e hídrica y por lo tanto evitar y aún hacer retroceder la desertificación.

1.3 Usos del árbol de tamarindo (*Tamarindus indica*) y usos de la planta nopal (*Opuntia ficus indica*).

1.3.1 Usos del árbol de Tamarindo (*Tamarindus indica*)

Tamarindo es una fruta versátil, que se puede utilizar para muchos propósitos. El sabor dulce / ácido único de la pulpa es popular en cocinar y condimentar. Prácticamente todas las partes del árbol (madera, raíz, hojas, corteza y frutos) tienen algún valor en la subsistencia de la población rural y una serie de aplicaciones comerciales son bien conocidas; y otras que tienen el potencial de un mayor desarrollo.

➤ AGROFORESTERÍA Y USO DE LA TIERRA

Incorporando el árbol de tamarindo con cultivos anuales puede mejorar los ingresos agrícolas de las poblaciones rurales, proporcionando un ingreso constante al agricultor, ya que una vez que el tamarindo ha pasado su etapa juvenil y entra de producción, proporcionará un suministro constante de fruta, además del producto de las especies de cultivo anuales; de esta manera, el agricultor obtiene más de la misma área de tierra.

➤ PULPA

El tamarindo se valora principalmente por su fruta, especialmente la pulpa, que se utiliza para una amplia variedad de propósitos domésticos e industriales; por su sabor dulce-ácido es a menudo comido fresco directamente de la vaina, casi siempre así en las Indias Occidentales y otras partes de Mesoamérica. La pulpa se retira generalmente de la vaina y se utiliza para preparar jugo (refresco), mermelada, jarabe y caramelo. En Asia sin embargo, las vainas verdes inmaduras son comidas a menudo por los niños y los adultos sumergidos en sal como un bocado.

Además, la pulpa ácida se utiliza como ingrediente favorito en preparaciones culinarias como curry, chutneys, salsas, helados y sorbetes en países donde el árbol crece de forma natural. También se utiliza en la India, para hacer el "pez tamarindo", una salmuera de comida de mar. Las vainas tiernas inmaduras se usan como condimento para arroz cocido, carne y pescado y también se preparan

deliciosas salsas para patos, aves acuáticas y gansos. En los países de África oriental, la pulpa se cocina y se convierte en una papilla llamada "ugali" hecha de sorgo o harina de maíz o disuelta para hacer una bebida dulce.

La bebida de tamarindo es popular en muchos países de todo el mundo, son muchas recetas diferentes, en algunos países africanos, el jugo de pulpa es mixto con cenizas de madera para neutralizar el sabor amargo del ácido tartárico, pero el método común es agregar el azúcar para hacer una bebida agradablemente ácida; en Ghana, La pulpa se mezcla con el azúcar y la miel para hacer una bebida dulce.

➤ **SEMILLA**

La semilla de tamarindo es un subproducto de la utilización comercial de la fruta, sin embargo, tiene varios usos, en el pasado, las semillas se han desperdiciado. En 1942, dos científicos indios, T.P. Ghose y S. Krishna, anunciaron que los granos decorticados contenían 46-48% de una sustancia gelificante por lo cual se patentó un proceso para la producción de un producto denominado "jellosa", "poliosa", o "pectina". La sustancia se gelatiniza con concentrados de azúcar incluso en agua fría o leche, se ha sugerido el nombre 'jellosa' para este polisacárido, ya que describe tanto sus propiedades formadoras de gelatina como el carácter de hidratos de carbono, se ha recomendado su uso como estabilizante en helado, mayonesa y queso y como ingrediente o agente en varios productos farmacéuticos.

La presencia de taninos y otras materias colorantes en la testa hacen que la semilla entera sea inadecuada para el consumo humano. Por lo tanto, la testa debe separarse de los granos por ebullición o tostado. De lo contrario, pueden producirse efectos secundarios tales como depresión, estreñimiento y trastornos gastrointestinales. En Gambia, las semillas son golpeadas y comidas en tiempos de hambre, en la India, los granos de semillas se utilizan en épocas de escasez de alimentos en los distritos de Chennai, Andhra y Madhya Pradesh y en otros lugares, ya sea solos o mezclados con harinas de cereales.

En la India, las mujeres de la aldea asan las semillas y las mastican en lugar de la nuez de betel, se afirma que las semillas tostadas son superiores que los cacahuets en sabor, y también se utilizan como sustituto o adulterante del café. A veces se convierten en harina para pan y pastelería.

La semilla también se utiliza en las industrias de procesamiento de vegetales y alimentos; Xiloglucano de tamarindo, comúnmente conocido como "goma de tamarindo", se utiliza para engrosar, estabilizar y gelificar los alimentos, está comercialmente disponible como aditivo alimentario para mejorando la viscosidad y textura de los alimentos procesados.

➤ **HOJAS Y FLORES**

Las hojas, las flores y las vainas inmaduras de tamarindo son también comestibles. Las hojas y las flores se utilizan para hacer curry, ensaladas, estofados y sopas en muchos países, especialmente en tiempos de escasez. En la India, las hojas se convierten en un plato llamado 'Chindar'. Las plántulas también se comen como un vegetal, las hojas jóvenes del tamarindo se utilizan como condimento vegetal en algunas recetas tailandesas del alimento debido a su acidez y aroma específico. En Zimbabue, las hojas se añaden a la sopa y las flores utilizadas en las ensaladas. Además las flores son un recurso importante del néctar para las abejas en el sur de la India, la miel es de color amarillo dorado y ligeramente ácido en sabor.

➤ **RAMAS Y CORTEZA**

Después de un lapso de más de medio siglo los tintes vegetales naturales han recuperado considerable importancia en todo el mundo debido a su naturaleza eco amigable. Muchos países productores de tamarindo pueden desempeñar un papel vital en este campo y servir como fuente potencial de colorantes naturales, la corteza y las hojas de tamarindo contienen taninos, y la corteza indica que contienen hasta el 70%, que se ha utilizado en la industria del curtido y teñido de pieles. En Zambia, los taninos de corteza se utilizan en la preparación de tinta y para fijar colorantes. La corteza también se quema para hacer tinta en muchos otros países africanos.

➤ **MADERA**

La madera del tamarindo tiene muchos usos incluyendo útil para la construcción muebles, las ruedas, martillos, herramientas de arado, las canoas, los tabloncillos laterales para los barcos, herramientas y mangos de herramientas, tornos, etc. Se considera una madera muy durable y se utiliza en la fabricación de muebles, ya que tiene un buen pulimento, sin embargo, debido a su dureza, es difícil de trabajar y puede agrietarse durante el secado.

El árbol tiende a hacerse hueco en el centro a medida que envejece, y por lo tanto es difícil conseguir un tablón de tamarindo de cualquier ancho, por esta razón su valor en la construcción de viviendas es limitado. Sin embargo, la gente de las Islas Reunión francesas considera que el tamarindo es una madera de alta calidad valorada para la fabricación de muebles y en América del Norte.

➤ **USOS MEDICINALES**

El valor medicinal del tamarindo se menciona en la literatura sánscrita tradicional. Las propiedades laxantes de la pulpa y las propiedades diuréticas de la savia de las hojas han sido confirmadas por la ciencia médica moderna. Los frutos de tamarindo eran bien conocidos en Europa por sus propiedades medicinales, habiendo sido introducidos por comerciantes árabes de la India. Los productos de tamarindo, las hojas, los frutos y las semillas han sido ampliamente utilizados en la medicina tradicional india y africana.

Varias propiedades medicinales se reivindican para preparaciones que contienen pulpa de tamarindo, hojas, flores, corteza y raíces, en varias encuestas recientes se han enumerado los usos folclóricos locales del tamarindo como remedios para dolencias. Éstos incluyen el uso como antiinflamatorios en el norte de África, el uso como hierbas medicinales en Burkina Faso, el uso contra la leucorrea en Odisha, India, y el uso para los trastornos de la piel en Gujarat.

➤ **ACEITES ESENCIALES**

Son mezclas complejas de componentes volátiles, que resultan del metabolismo secundario de plantas; están compuestos por hidrocarburos del grupo de los terpenos, y por compuestos oxigenados de bajo peso molecular como los son los alcoholes, aldehídos, cetonas, esterés y ácidos, éstos son los que le dan a los aceites esenciales el aroma que los caracteriza.

Los aceites esenciales se acumulan en estructuras secretoras especializadas ubicadas en diferentes partes de la anatomía de las plantas; por ejemplo, se biosintetizan en los tricomas glandulares (hojas) o en glándulas (cáscaras), en las plantas se pueden ubicar en general, en pelos glandulares del tallo y hojas (menta, lavanda, salvia), en las células modificadas del parénquima como en las piperáceas (pimienta), en tubos oleíferos (canela), en tubos esquizógenos (anís, hinojo), o canales lisígenos (pino), entre otros.

1.3.2 Nopal (*Opuntia ficus indica*)

De esta planta (*Opuntia ficus-indica*) se utiliza el mucílago, la cáscara, la pulpa y sus compuestos químicos para la elaboración de aceites comestibles, pectinas y colorantes. La tuna, la fruta del Nopal *Opuntia ficus indica* se emplea también en la elaboración de vinos, licores, refresco, miel de tuna tipo maple, queso de tuna, mermeladas, jaleas, deshidratados para dulces de alto valor energético, barras de cereales, alcohol industrial, vinagres, aromatizantes, pasta y harina forrajera.

El contenido de fibras, proteínas, minerales y materias grasas de la *Opuntia ficus-indica* es mayor que el encontrado en otras frutas; una taza de los frutos de esta planta contiene 5g de fibra, 20% (más de la cantidad recomendada para el consumo diario) también 6% de hierro, 6% de calcio y 7% de potasio. Sus carbohidratos se componen de glucosa o fructosa. Por las características nutricionales de este fruto, la tuna encaja en prácticamente en cualquier dieta, sea esta baja en sodio, alta en fibra, para pérdida de peso ya que combinado con cítricos es un buen diurético y para tratar diabetes.

El fruto posee un valor nutritivo superior al de otras frutas en varios de sus componentes: 100 g de la parte comestible posee 58 a 66 unidades calóricas, 3 g de proteínas, 0,20 g de grasas, 15,50 g de carbohidratos, 30 g de calcio, 28 g de fósforo y vitaminas (caroteno, niacina, tiamina, riboflavina y ácido ascórbico).

Es empleado para otros usos caseros e industriales tales como los que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 1.5. Aplicación y usos de *Opuntia ficus indica* y del fruto (tuna).

APLICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Forraje	la utilización del nopal como forraje es el uso más importante por su volumen
Cerco	La utilización de variedades espinosas para formar cercos en los huertos familiares y en los predios ganaderos es común en vista de que sirve como una barrera de protección contra agentes externos.
Substrato para la producción de grana de cochinilla	La obtención de colorante carmín, producto de la cochinilla (<i>Dactilopuscoccus Costa</i>) que parasita el nopal, tiene gran utilización en la industria alimenticia y textil siendo demandado por la industria de embutidos cárnicos, cosméticos y medicinales.
Planta medicinal	El consumo de nopalitos y de tuna ácida (el xoconostle) ha probado que abate los niveles de azúcar y colesterol de la sangre, por lo que la gente los consume cocinados, así como en cápsulas y comprimidos.

continúa

continuación

Tabla 1.5. Aplicación y usos de *Opuntia ficus indica* y del fruto (Tuna).

APLICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Materia prima industrial	En México se procesa el nopal como alimento (en salmuera y escabeche), principalmente para el mercado de exportación para la obtención de mermeladas, jugos, néctares, colorantes, pectinas y fructosa.
Conservación del suelo	El nopal se utiliza para proteger el suelo y frenar la desertificación, es una planta que puede formar “setos” en curvas de nivel que ayudan a controlar la erosión del suelo, además de que soporta los ambientes desfavorables del desierto, caracterizados por una precipitación pobre y errática y alta oscilación térmica diaria y anual.
Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano	Producción de diversos alimentos como encurtidos, mermeladas, jugos, néctares, productos deshidratados, concentrados, jarabes, bebidas alcohólicas de tuna y nopalitos.
Agroindustria de alimentos para animales	Suplementos y piensos de pencas y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas.
Industria farmacéutica	Protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal.
Industria cosmética	Cremas, shampoo, lociones.

continúa

continuación

Tabla 1.5. Aplicación y usos de *Opuntia ficus indica* y del fruto (tuna).

APLICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Industria productora de aditivos naturales	Gomas de cladodios; colorantes de la fruta.
Sector de la construcción	Compuestos ligantes de los cladodios.
Sector productor de insumos para la agricultura	Productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos.
Sector turismo	Artesanías en base a cladodios lignificados.
Industria de suplementos alimenticios	Fibra y harinas de cladodios, con fines de control de la diabetes, obesidad, entre otros.
Industria textil	uso indirecto de la planta como hospedero de la grana cochinilla para producir colorantes naturales

CAPITULO 2. PROCESOS DE EXTRACCION DE FLOCULANTES A PARTIR DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (*Tamarindus indica*) Y DEL CLADODIO DEL NOPAL (*Opuntia ficus indica*)

Para lograr una concentración adecuada de los principios activos contenidos en las plantas y que su acción floculante sea más efectiva es necesario realizar diversos procedimientos mediante los cuales sean extraídos. El procedimiento se realiza con solventes adecuados que se seleccionan de acuerdo a la solubilidad y la estabilidad que posean las sustancias.

2.1 Método de extracción del floculante a nivel de laboratorio partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)

De acuerdo a los análisis químicos realizados a la semilla del tamarindo, se ha encontrado que los componentes responsables de la floculación de dicha semilla son los ácidos glutámico y aspártico, por ser sustancias que poseen grupos con cargas formales negativa y positiva que le permiten desestabilizar y flocular un agua residual. Guardián, R., Coto, J. (2011).

Al igual que la Moringa oleífera, la semilla de tamarindo presenta proteínas constituidas principalmente por aminoácidos como glicina, leucina, ácido glutámico y aspártico. La glicina y la leucina son aminoácidos alifáticos, no solubles en agua, y los ácidos glutámico y aspártico son aminoácidos con caracteres ácidos y solubles en agua. Lo anterior haría suponer que las sustancias responsables de la coagulación en la semilla de tamarindo son las terminaciones de ácido glutámico y aspártico.

Una vez adquiridas las semillas de tamarindo, estas son llevadas al laboratorio para la extracción del floculante a partir de los cotiledones de las semillas del tamarindo, el método que más se ha usado para ese fin es el que se presenta a continuación:

PASO 1

- Extraer los cotiledones de las semillas

PASO 2

- Remover la pulpa

PASO 3

- Retirar la membrana que cubre la semilla

PASO 4

- Hidratar durante 5 a 7 días.

PASO 4

- Posterior a la hidratación, remover la capa marrón que cubre los cotiledones de color blanco

PASO 5

- Triturar los cotiledones en un procesador doméstico hasta obtener un polvo de color blanco.

PASO 6

- Preparar la suspensión, para ello pesar 5 gr del polvo obtenido y colocarlos en un vaso de precipitado agregar agua destilada hasta completar 100 ml de suspensión.

PASO 7

- Colocar la suspensión en una plancha de agitación y calentar hasta alcanzar una temperatura de 65°C, obteniendo así una mezcla viscosa que se deja reposar a temperatura ambiente, separándose en dos fases: una acuosa y una viscosa.

PASO 8

- De la suspensión coagulante se extrae el sobrenadante (fase acuosa) y se aplica en diferentes dosis 2.5, 3, 3.5, 4 y 4.5 ml a muestras de agua residual.

2.1.1 Otros métodos de extracción

- **HIDRODESTILACIÓN**

Cuando se usa vapor saturado, pero la materia prima está en contacto íntimo con el agua generadora del vapor, se le llama “hidrodestilación” (Günther, 1948) Es común en el aislamiento de esencias florales. En la hidrodestilación el material vegetal se sumerge en el agua, la cual se lleva a ebullición para que penetre los tejidos de la planta y disuelva una parte del aceite esencial contenido en las estructuras, la disolución acuosa se difunde a través de las membranas de las células, y el aceite se vaporiza inmediatamente desde la superficie. El proceso continúa hasta remover todo el aceite contenido en las glándulas de la planta, a fin de que los vapores puedan ser condensados y colectados. Aquí un factor importante es el calentamiento, si el alambique se calienta con fuego directo, el agua contenida en él debe ser suficiente para llevar a cabo toda la destilación; es necesario evitar el sobrecalentamiento y la carbonización del material vegetal, entonces se requiere de tiempos de calentamiento largos y adición de agua en grandes cantidades, lo cual incrementa el costo y el tiempo de operación.

- **DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR**

Es el método más usado a nivel industrial, permite obtener aceite esencial con buenos rendimientos, y además se pueden procesar grandes cantidades de material vegetal. La materia prima vegetal es cargada de manera que forme un lecho fijo compactado; su estado puede ser molido, cortado, entero o la combinación de éstos. El vapor de agua es inyectado mediante un distribuidor interno, próximo a su base y con la presión suficiente para vencer la resistencia hidráulica del lecho (Vargas, 2008). Es así que, cuando se usa vapor saturado o

sobrecalentado, fuera del equipo principal, es llamado “destilación por arrastre de vapor” (Günther, 1948). La generación del vapor puede ser local (hervidor), remota (caldera) o interna (base del recipiente). Conforme el vapor entra en contacto con el lecho, la materia prima se calienta y va liberando el aceite esencial, el cual debido a su alta volatilidad se evapora y al ser soluble en el vapor circundante es “arrastrado” corriente arriba hacia el tope del destilador. La mezcla, vapor saturado y aceite esencial, fluye hacia un condensador mediante una prolongación curvada del conducto de salida del destilador. En el condensador, la mezcla es enfriada hasta la temperatura ambiental, a su salida, se obtiene una emulsión líquida inestable la cual es separada en un decantador dinámico o florentino, éste equipo está lleno de agua fría al inicio de la operación y el aceite esencial se va acumulando debido a su casi inmiscibilidad en el agua y a la diferencia de densidad con la misma.

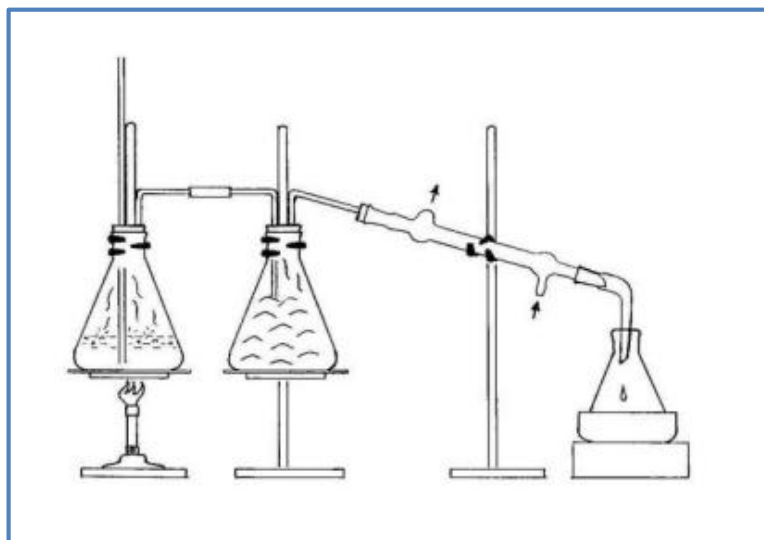


Figura 2.1 Destilación por arrastre de vapor.

Fuente: Saavedra, Mario. (2016).

➤ **EXTRACCIÓN DE Prensado en Frío**

Es una forma de extracción, donde no se aplica un calor adicional al producto crudo. Aunque no sea un método práctico de extracción para todos los aceites vegetales del mercado, es el recomendado como método de extracción preferido, ya que ayuda al aceite a mantener su estado original en cuanto a constituyentes e

intensidad. Cuando en una materia oleaginosa, el contenido graso no excede de un 10 a 12%, no se puede efectuar la extracción del mismo por medio de prensas ni de otros elementos mecánicos, porque la exigua cantidad que se obtendría, si no es una grasa de mucho valor, no compensa el costo de la extracción; y cuando en una materia oleaginosa aquella proporción es solamente un 6 a 7%, su extracción por dichos medios es nula, sea cualquiera la intensidad de presión que se ejerza sobre dicha materia (Parada, 2005). Los aceites esenciales de cítricos obtenidos por prensado tienen características de olor superiores a los obtenidos por cualquier método de destilación. Esto es debido a la ausencia de calor durante el procesado y a la presencia de componentes que no serían volátiles en el vapor.

Son también más estables a la oxidación, ya que contienen sustancias antioxidantes naturales, como tocoferoles, las cuales no son volátiles en el vapor. La ausencia de daño térmico en el aceite es significativa. A medida que se extrae el aceite se agrega agua para lavarlo de la piel formando un líquido viscoso. Luego es llevado a un prensado final que separa el aceite de los restos de piel. La solución de aceite se centrifuga a (8000-10000 rpm) para separar la parte viscosa en una emulsión rica en aceite. La porción lodosa a menudo se descarta, pero la acuosa puede filtrarse y retornar al lavado de la cáscara para la obtención de más aceite. Así, reciclando el agua, se van recuperando las pequeñas porciones de aceite que ésta pudiera arrastrar. (Saavedra, Mario. 2016).

➤ **EXTRACCIÓN POR EXTRUSIÓN**

La extrusión es un método simple por medio del cual es posible obtener un aceite esencial de características muy cercanas al producto natural, porque no se realizan tratamientos térmicos. Sin embargo, esta técnica sólo es aplicable a materiales vegetales que contienen la esencia en grandes cantidades en las células superficiales, por lo general el pericarpio de los frutos cítricos. Este proceso puede ser efectuado manualmente (prensa) o por medios mecánicos “cold pressing” e involucra la perforación de las glándulas aceiteras en el pericarpio del fruto, la extrusión mecánica y el lavado con agua. El producto como emulsión agua-aceite es impuro debido a la presencia de sustancias proteicas y

mucilaginosas, lo que implica una posterior centrifugación. (Saavedra, Mario. 2016).

➤ **EXTRACCIÓN POR SOLVENTES**

El material previamente debe de ser molido, macerado ó picado, para permitir mayor área de contacto entre el sólido y el solvente. El proceso ha de buscar que el sólido, o el líquido, o ambos, estén en movimiento continuo (agitación), para lograr mejor eficiencia en la operación. Se realiza preferiblemente a temperatura y presión ambientes. El proceso puede ejecutarse por batch (por lotes ó cochadas) ó en forma continua (percolación, lixiviación, extracción tipo Soxhlet). Los solventes más empleados son: Etanol, metanol, isopropanol, hexano, ciclohexano, tolueno, xileno, ligroína, éter etílico, éter isopropílico, acetato de etilo, acetona, cloroformo; no se usan clorados ni benceno por su peligrosidad a la salud. Los solventes se recuperan por destilación y pueden ser reutilizados

El solvente adicionalmente extrae otros componentes como colorantes, gomas, mucílagos, ceras, grasas, proteínas y carbohidratos. En la etapa de recuperación de los solventes (atmosférica ó al vacío), después de los condensadores ha de disponerse de una unidad de enfriamiento, para la menor pérdida del solvente. Aunque se ha reportado que, el tricloetileno es el que tiene mayor poder disolvente, la realidad es que hoy en día el solvente más utilizado es el hexano, porque con él se obtiene mayor calidad de aceite y se disminuyen otros problemas, como la peligrosidad (explosión), toxicidad, así como la corrosión en las instalaciones.

➤ **EXTRACCIONES POR MEDIO DE LIXIVIACIÓN**

Las extracciones por medio de lixiviación, utilizado para materias oleaginosas con un contenido de aceite superior al 40%, requieren además de un proceso de eliminación de los solventes. El solvente más usado en el mundo hasta hace algunos años para la extracción era el hexano industrial por su selectividad hacia los glicéridos y facilidad de recuperación. Para aumentar la eficiencia de éste proceso de extracción, actualmente se emplean extractores

modernos que operan en proceso continuo, con lecho móvil a contracorriente, obteniéndose dos corrientes: la fase líquida de miscela (constituida por solvente y aceite) y la fase sólida que es la torta. De acuerdo con la eficiencia de operación en el proceso y con la composición del material oleaginoso, una fracción de aceite queda ligada a la torta.

2.2 Métodos de extracción aplicados al cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*).

➤ **OBTENCIÓN DE FLOCULANTE DE NOPAL EN POLVO**

Para extraer el floculante de nopal en polvo se aplicó un procedimiento similar al sugerido por Almendárez (2004). Es una metodología general involucra cinco etapas, las cuales consisten en reducción inicial de tamaño, secado, molienda y tamizado, extracción de clorofila, y eliminación de solvente. (Villabona Ortiz, Paz Astudillo, & Martínez García, 2013).

Para el desarrollo del procedimiento descrito en la figura 2.2, se utilizaron siete pencas, de 21 cm de largo, 12 cm de ancho y 1.2 cm de espesor en promedio, estas serán lavadas y peladas para retirarle la capa exterior (cutícula):



Figura 2.2 Diagrama de extracción del nopal (*Opuntia ficus indica*).

➤ EXTRACCIÓN CONVENCIONAL (SOXHLET)

La extracción convencional se basa en la técnica de arrastre con vapor, ésta trabaja con un solvente inicialmente en estado líquido y a presión atmosférica, eleva su temperatura superando el punto de ebullición, cambia a estado gaseoso para permitir que el vapor penetre en el interior de la materia vegetal y así extraer los componentes de su interior por diferencia de concentración. El material vegetal y el solvente en estado líquido inicialmente no se encuentran en contacto directo, por esta razón, la tasa de saturación del solvente es baja y el rendimiento del método es alto, esto lo aplicaremos en la extracción de la clorofila del Nopal (*Opuntia ficus-indica*), de esta manera se extraerá el colorante de color verdoso.

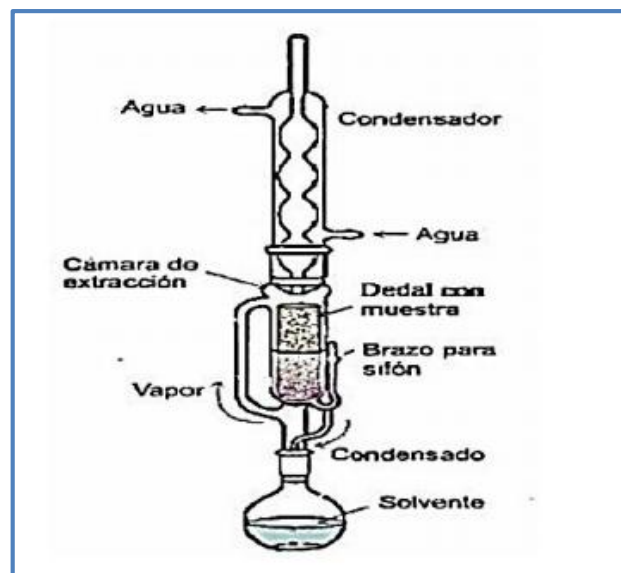


Figura 2.3 Equipo tipo soxhlet

Fuente: Saavedra, Mario. (2016).

OBTENCIÓN DEL COAGULANTE A PARTIR DEL MUCILAGO DEL NOPAL

De los cladodios del Nopal (*Opuntia ficus-indica*), se debe de extraer su mucílago que actúa como floculante natural, empleando las operaciones de pelado, lavado, escurrido, almacenado, troceado, molienda, tamizado, centrifugado y secado.



Figura 2.4 Diagrama de extracción del nopal (*Opuntia ficus indica*).

Fuente: elaboración propia

CAPITULO 3. EXTRACCION DE LOS FLOCULANTES NATURALES A PARTIR DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (*Tamarindus indica*) Y DEL CLADODIO DEL NOPAL (*Opuntia ficus indica*) A NIVEL DEL LABORATORIO.

Se selecciona la metodología de extracción para los floculantes naturales basándose en los mejores resultados obtenidos en investigaciones previas. La metodología utilizada para la toma y preservación de la muestra se aprecia a continuación:

3.1 Metodología estándar para la toma y preservación de la muestra de agua residual

El objetivo del muestreo de agua residual es obtener una parte representativa del material bajo estudio, para la cual se analizarán las variables fisicoquímicas de interés. El volumen del material captado se transporta hasta el lugar de almacenamiento (cuarto frío, refrigerador, nevera, etc.), para luego ser transferido al laboratorio para el respectivo análisis, momento en el cual la muestra debe conservar las características del material original. Para lograr el objetivo se requiere que la muestra conserve las concentraciones relativas de todos los componentes presentes en el material original y que no hayan ocurrido cambios significativos en su composición antes del análisis (Calderón, 2013).

3.1.1 Ubicación del punto de muestreo

Para la realización del muestreo del agua residual se realizó en un solo lugar, de las cuales se extraerán muestras simples obtenidas de una pileta que se encuentra justo a la salida de las tuberías de descargas, donde se drenan todas las aguas residuales, es ahí donde el agua se encuentra en estado cruda, no ha recibido ningún tratamiento.

La empresa está ubicada en antiguo Cuscatlán, la Libertad, El Salvador, esa fue una de las ventajas para realizar este Trabajo de Graduación, nos facilitaron el muestreo y a una distancia considerable con respecto a la Universidad de El Salvador.

3.1.2 Tiempo y frecuencia del muestreo

Durante la duración del desarrollo del estudio se realizaron 5 muestreos, uno por cada semana, siguiendo la siguiente programación:

- a) Se realizó un muestreo inicial con el objetivo de caracterizar el agua residual analizando los parámetros establecidos: DBO, DQO, pH, turbidez.
- b) El resto de los muestreos se realizó para la utilización en el sistema de tratamiento a nivel de laboratorio para verificar la efectividad del sistema en la remoción de los floculantes del cual se tomó de la primera cámara de descarga del agua residual de la lavandería industrial (Ver Esquema de Planta de tratamiento. (Ver anexo 3).

3.1.3 Selección de Envases para la toma de muestras

El material de los envases, debe ser inerte, de manera que no produzca alteraciones en la composición de la muestra, tales como pérdidas por adsorción, volatilización o contaminación por materias extrañas. En general los materiales más utilizados son el vidrio neutro y el polietileno de alta densidad, requiriéndose en algunos casos materiales más específicos como por ejemplo el vidrio ámbar o el poli tetrafluoretileno PTFE, ya sea para el envase mismo o para sus tapas. (Calderón, 2013).

3.1.4 Volumen de muestra

Los volúmenes de muestra fueron de 1 galón (3.78 litros), se muestreo con una frecuencia de tres veces por semana, obteniendo en total 15 muestras simples, esto se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Cronograma de muestreo

Numero de Semana	Cantidad de Muestras	Punto de Muestreo
Semana 1	3	Primera Cámara de Descarga
Semana 2	3	
Semana 3	3	
Semana 4	3	
Semana 5	3	
Total de muestras	15	

Fuente: Elaboración propia

3.1.5 Procedimiento de recolección

- a) El equipo utilizado para el muestreo fue: gabacha, guantes, mascarilla.
- b) Se utilizaron baldes plásticos para realizar la recolección del agua residual de la cámara de descarga, para luego transferirla en recipientes plásticos nuevos, de boca estrecha y de rosca con sello los cuales debieron enjuagarse 7 veces con el agua de muestra.
- c) Se llenaron los recipientes hasta al ras.
- d) Luego se etiquetaron los frascos con su respectiva fecha, hora y lugar de toma de la muestra.

3.1.6 Transporte, preservación y conservación de la muestra

- ✓ La técnica de preservación mediante refrigeración se debe aplicar durante la recolección y el transporte, la temperatura de refrigeración debe ser entre 1 y 4°C para muestras bacteriológicas y de $4 \pm 2^\circ\text{C}$ para muestras físico-químicas, evitando la congelación en ambos casos. (Calderón, 2013).
- ✓ El transporte de los envases se deberá realizar en hieleras plásticas, debidamente tapadas para evitar la radiación solar y el calor, las muestras deberán ser llevadas inmediatamente al laboratorio para la realización de los análisis. Para la preservación no será necesaria la adición de ninguna sustancia química debido al tipo de parámetros a analizar. En el caso por algún motivo las muestras no puedan llevarse al laboratorio de inmediato, estas se deberán almacenar a una temperatura de 4°C en ausencia de luz, por un período no mayor a las 24 horas, ya que un tiempo prolongado de almacenamiento afecta en mayor medida a algunas determinaciones, ya sea por pérdidas debidas a adsorción en las paredes de los envases, intercambios iónicos, precipitación, solubilidad, actividad microbiana u otra serie de reacciones. Este tiempo se debe reducir al mínimo posible, siendo necesario incluso que algunos análisis sean realizados in situ.

3.2 Selección del método de extracción de floculante

En este capítulo se presenta un estudio experimental a escala de laboratorio con el objetivo de evaluar la efectividad de los floculantes naturales a partir de: nopal (*Opuntia ficus indica*) y semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*), en el proceso de tratamiento de aguas residuales procedentes de una lavandería industrial y mediante una prueba de coagulación-floculación determinar la dosis óptima y pH de operación. La variable respuesta fue el porcentaje de remoción de la turbidez en las muestras de agua residual tratada.

El método seleccionado para la extracción del floculante a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) fue el descrito en la sección 2.1 propuesto por Hernández, B. Mendoza, I. (2015), al cual se le realizaron modificaciones (ver sección 3.2) con el fin de obtener una mejor caracterización del proceso de extracción.

El método seleccionado para la extracción del floculante en polvo a partir del nopal (*Opuntia ficus indica*) se tomó como punto de partida la metodología propuesta por Villabona Ortiz, Paz Astudillo, & Martínez García(2013) en la sección 2.2 que involucra cinco etapas, las cuales consisten en: reducción inicial de tamaño, secado, molienda y tamizado, extracción de pigmentos, y eliminación de solvente; el cual se tomó como referencia, debido a que se hicieron modificaciones (ver sección 3.3).

Todas las modificaciones que se realizaron en ambos procesos de extracción de los floculantes naturales fueron aplicadas con la finalidad de mejorar el proceso y el rendimiento del producto final, y de la misma manera tenemos una reducción de tiempo para la producción de los floculantes.

3.2.1 Descripción de equipo utilizado para algunos análisis fisicoquímicos del agua.

La evaluación de parámetros fisicoquímicos se ha efectuado en muestras de agua antes y después de ser tratada con el proceso de coagulación-floculación, donde los análisis de turbidez, pH, Sólidos Suspendidos Totales (SST) se realizaron en la Planta Piloto de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, con equipo específico para cada una de las pruebas, estas descripciones se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Descripción de los equipos utilizados en el laboratorio

DESCRIPCIÓN	EQUIPO
<p>El equipo Vernier Lab Quest se utiliza para recoger datos de los sensores que el mismo equipo contiene, su conectividad inalámbrica permite evaluar parámetros de manera fácil y precisa.</p>	
<p>El sensor que se ocupó fue el del turbidímetro, forma parte del equipo Vernier Lab Quest, permite medir la turbidez de forma rápida y fácil de utilizar.</p>	
<p>El parámetro que se evaluó fue el del pH en el cual se utilizó un pH-metro marca Thermo Scientific modelo Orion 3 Star.</p>	
<p>Se ocupó una estufa para realizar secados de los cladodios del Nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) y para los análisis del Sólidos Suspendidos Totales (SST).</p>	
<p>Por medio de un Hot Plate y un agitador magnético se realizó la agitación continua del agua residual.</p>	
<p>La balanza analítica se utilizó para realizar mediciones de pesada con mayor exactitud, evitando incertidumbres grandes.</p>	

continúa

continuación

Tabla 3.2 Descripción de los equipos utilizados en el Laboratorio

DESCRIPCIÓN	EQUIPO
<p>Las Bandejas metálicas se utilizaron para secar la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) y el mucilago del nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>).</p>	
<p>La licuadora industrial consta de cuchillas de acero inoxidable, fue el instrumento que nos permitió triturar las semillas de tamarindo.</p>	
<p>Con la ayuda de una serie de tamices USA Standard se separaron las partículas trituradas de ambos floclantes para obtener un tamaño de partícula permisible.</p>	
<p>Los agitadores magnéticos se utilizaron para obtener una mejor agitación y constante, de esta manera se realizaba una mejor mezcla con el agua residual y el floclante, el requisito es que todos tienen que tener un mismo tamaño para realizar la prueba de jarras.</p>	
<p>El equipo Soxhlet fue una herramienta para lograr retirar pigmentos de color verde del mucilago del nopal, este consta de un matraz esmeril, refrigerante y un tubo sifón en el cual se introduce el cartucho (materia prima), este tubo termina con una boca esmerilada para adaptarse al tubo extractor.</p>	

3.3 Extracción del floculante a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus Indica*)

3.3.1 Descripción del método de extracción para floculante a partir de semilla de tamarindo

El método a utilizar para la extracción de floculante a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) consta de 5 etapas (despulpado, secado, molienda, tamizado y maceración), las cuales son descritas a continuación:

➤ **DESPULPADO:**

Para el despulpado se separa la pulpa de la semilla de forma manual, y esta última se somete a un proceso de hidratación durante 3 días. El residuo que se obtiene es la cascarilla de la semilla, la cual es un desecho común orgánico, el agua del lavado de pulpa no contiene ningún químico por lo cual puede descargarse directamente al alcantarillado. Una vez hidratada, se removi6 de forma manual la capa marr6n hasta obtener los cotiledones de color blanco.

➤ **SECADO:**

El secado se lleva a cabo en bandejas de met6licas en la estufa, durante un tiempo de 12 horas a una temperatura de 65°C.

➤ **MOLIENDA:**

Para la molienda se utiliza una licuadora industrial con cuchillas de acero inoxidable para la reducci6n de tama6o, y como producto se obtiene un polvo de color blanco.

➤ **TAMIZADO:**

El polvo obtenido en la etapa de molienda, se tamiza en una malla est6ndar USA #20, obteniendo part6culas inferiores a 0.85 mm de di6metro.

➤ **MACERACIÓN (EXTRACCIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO):**

El polvo tamizado en la etapa anterior se procede a macerar; para lo que se agregan 20 g en 400 ml de agua destilada y se mantiene en una agitación constante durante 20 minutos a una temperatura de 65 °C, luego se deja reposar a temperatura ambiente hasta observar 2 fases (una acuosa y otra viscosa); por medio de la decantación se procede a separar la parte acuosa, la cual es la utilizada como floculante, mientras que la parte viscosa es un residuo orgánico.

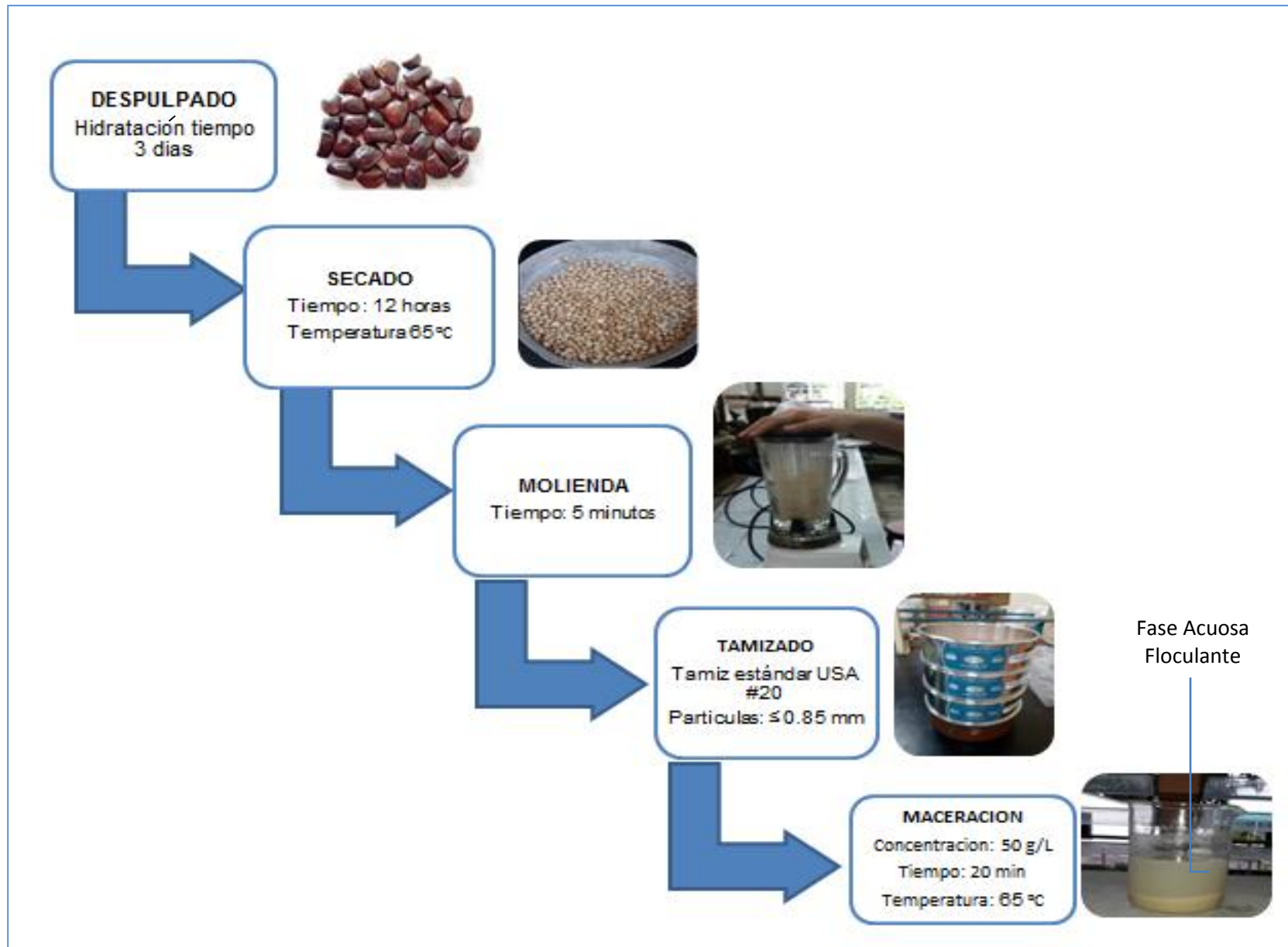


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la extracción del floculante de tamarindo (*Tamarindus indica*).

3.3.2 Determinación de dosis óptima y pH de operación (pruebas preliminares)

La prueba de jarras es un procedimiento común de laboratorio para determinar las condiciones óptimas en el tratamiento de aguas residuales. Este método permite realizar ajustes en el pH, las variaciones en la dosis de coagulante y alternar la velocidad de mezclado. Las pruebas preliminares fomentaran las bases del desarrollo de experimento propuesto en el capítulo 4.

Prueba de jarras de a semilla de tamarindo (*Tamarindus Indica*).

Esta prueba se realiza a nivel de laboratorio tomando con la ayuda de una probeta una muestra de 200 ml del agua residual, para luego ser vertida en un beaker de 250 ml.

Para regular el pH del agua residual se instala un hot plate cerca del pH-metro y se agrega ácido sulfúrico mientras el agua residual esta en agitación con el fin de reducir el pH inicial de la muestra, logrando llevar la muestra a diferentes pH. Esta metodología es la realizada durante todas las pruebas.

Con el pH de operación regulado, el agua se mantiene en agitación constante con ayuda de un agitador magnético y un hot plate, para posteriormente agregar la dosis del floculante. Los tiempos de operación utilizados son; 1 minuto de agitación rápida, y 10 minutos de agitación lenta. Los parámetros de operación utilizados y los resultados obtenidos en la primera prueba pueden observarse en la tabla 3.3 y tabla 3.4 respectivamente. El floculante utilizado es la fase acuosa obtenida en el proceso de extracción (ver figura 3.1).

Prueba 1: La prueba se realiza a las siguientes condiciones:

Tabla 3.3 Condiciones Iniciales de la prueba

pH de la muestra Cruda	Turbidez inicial (NTU)	Dosis
9	352	4 ml

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba 1 fueron los siguientes:

Tabla 3.4 Resultados de la prueba 1.

pH inicial	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción	pH final
5	217	38.35%	5
6	225	36.07%	5.5
7	280	20.45%	6
8	300.1	14.74%	6.5
8.5	305.4	13.23%	6.8

Fuente: Elaboración propia

En la prueba 1 se logra una remoción máxima del 38.35 %, utilizando una dosis de 4 ml. Por lo cual se toma la decisión de realizar 3 pruebas más, aumentando la dosis gradualmente a 8 ml, 12 ml, y 16 ml de floculante. Las condiciones de operación y los resultados obtenidos se aprecian en las tablas: 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10.

Prueba 2: La prueba se realiza a las siguientes condiciones:

Tabla 3.5 Condiciones Iniciales de la prueba 2.

pH de la Muestra Cruda	Turbidez Inicial (NTU)	Dosis
9	352	8 ml

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de la prueba 2 son los siguientes:

Tabla 3.6 Resultados de la prueba 2.

pH inicial	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción	pH final
5	221.5	37.07%	5.1
6	248.8	29.31%	5.3

Continua

Continuación

Tabla 3.6 Resultados de la prueba 2.

pH inicial	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción	pH final
7.2	255.3	27.47%	6.2
7.4	296.2	15.90%	6.3

Fuente: Elaboración Propia

Prueba 3: La prueba se realiza a las siguientes condiciones:

Tabla 3.7 Condiciones Iniciales de la prueba 3.

pH de la Muestra Cruda	Turbidez Inicial (NTU)	Dosis
9	352	12 ml

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba 3 fueron los siguientes:

Tabla 3.8 Resultados de la prueba 3.

pH inicial	Turbidez final(NTU)	Porcentaje de remoción	pH final
5	228.5	35.08%	5.5
6.2	256.3	27.18%	5.8
7.2	292.5	16.90%	6.5
8.6	299.6	14.88%	7.8

Fuente: Elaboración propia

Prueba 4: La prueba se realizó a las siguientes condiciones:

Tabla 3.9 Condiciones Iniciales de la prueba 4.

pH de la Muestra Cruda	Turbidez Inicial (NTU)	Dosis
9	352	16 ml

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10 Resultados de la prueba 4

pH inicial	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción	pH final
5	250.4	28.86%	4.5
6.1	297.1	15.59%	5.2
7.4	309.0	12.21%	5.6
8.5	333.9	5.14%	6.8

Fuente: Elaboración propia

Al observar la tendencia de los resultados, es evidente que a mayor dosis de floculante agregado la remoción de turbidez disminuye. Por lo que se procede a realizar pruebas con una dosis menor (4 ml de floculante). Como se puede observar en la prueba 5, en las tablas 3.11 y 3.12.

Prueba 5: La prueba se realizó a las siguientes condiciones:

Tabla 3.11 Resultados de la Prueba 5.

pH de la Muestra Cruda	Turbidez Inicial (NTU)	Dosis
9	376.2	1.4 ml

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3.12 Resultados de la Prueba 5.

pH Inicial	Turbidez final	Porcentaje de remoción	pH final
5	200.1	46.82%	4.8
5.4	205.4	45.42%	5.4
6.1	273.1	27.42%	5.9
7	298.3	20.72%	6.3
8.3	311.8	17.35%	7.1

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla 3.12 se puede observar que el valor de pH óptimo obtenido es de 5, una vez obtenido el valor se fijó para encontrar la dosis óptima, como se puede apreciar en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Resultados de la prueba 5.

Dosis agregada de floculante	Turbidez final	Porcentaje de remoción	pH final
1.0 ml	310.1 NTU	17.59%	5
1.2 ml	240.0 NTU	36.22%	5.1
1.4 ml	203.8 NTU	45.84%	5.1
1.6 ml	192.3 NTU	48.86%	5
1.8 ml	192.2 NTU	48.92%	5.1
2.0 ml	193.1 NTU	48.68%	5

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las tablas 3.12 y 3.13 se pueden observar que valores óptimos de operación para la prueba 5 son los siguientes:

- ✓ pH: 5
- ✓ Dosis de floculante: 9mL/L

En la tabla 3.12 se observó una mejora en la remoción de turbidez, sin embargo con el fin de mejorar ese valor, se procede a cambiar algunos parámetros de operación como se observa en la prueba 6. (Ver tablas 3.14 y 3.15)

Prueba 6: La prueba se realizó a las siguientes condiciones:

- ✓ Turbidez inicial: 300 NTU
- ✓ Agitación rápida: 1 minuto
- ✓ Agitación lenta: 20 minutos
- ✓ Tiempo de reposo : 30 minutos

A partir de la tabla 3.15, el dato resaltado con un color morado significara que fue los mejor evaluado respecto a la remoción de fracción de turbidez en dicha prueba.

Tabla 3.14 Condiciones Iniciales de la prueba 6.

pH de la Muestra Cruda	Turbidez Inicial (NTU)	Dosis
9	300	1.4 ml

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba 6 fueron los siguientes:

Tabla 3.15 Resultados de la prueba 6.

pH Inicial	Turbidez final	Porcentaje de remoción	pH final
5	150.9	49.70%	5.1
5.5	160.4	46.53%	5.5
6	210.4	29.87%	5.8
6.5	225.6	24.80%	6
7	235.8	21.40%	6.3
7.5	246.5	17.83%	6.5

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla 3.15 se puede observar que el valor de pH óptimo obtenido es de 5, una vez obtenido el valor se fijó para encontrar la dosis óptima, como se puede apreciar en la tabla 3.16.

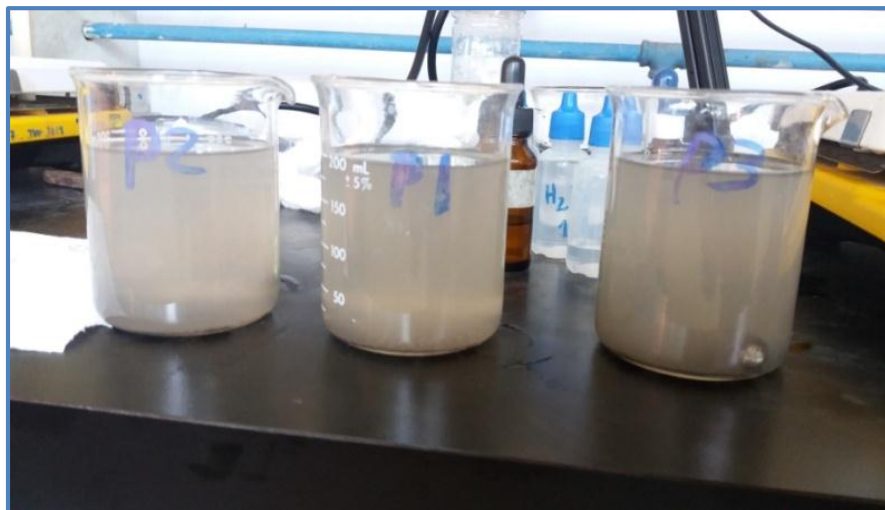


Figura 3.2 Fotografía de las pruebas realizadas con el floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*).

Tabla 3.16 Resultados de la prueba 6.

Dosis agregada de floculante	Turbidez final	Porcentaje de remoción	pH final
1.0 ml	260.1	13.30%	5.5
1.2 ml	230.6	23.13%	5.4
1.4 ml	190.2	36.60%	5.4
1.6 ml	140.1	53.30%	5.3
1.8 ml	139.9	53.37%	5.2
2.0 ml	138.3	52.90%	5.1

Fuente: Elaboración Propia

Los mejores valores de remoción de turbidez obtenidos para el floculante a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en las 6 pruebas realizadas son los mostrados en la tabla 4.16, con los siguientes valores óptimos de operación:

- ✓ pH : 5
- ✓ Dosis óptima: 9mL/L
- ✓ Agitación rápida: 1 minuto
- ✓ Agitación lenta: 20 minutos

3.4 Extracción del floculante a partir del cladodio del nopal (*Opuntia ficus indica*)

3.4.1 Descripción del método de extracción para floculante a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*).

➤ **REDUCCIÓN DE TAMAÑO:**

Para la reducción de tamaño primero eliminará la corteza y espinas, luego se corta con ayuda de un cuchillo en porciones de 5 cm aproximadamente para lograr un mejor secado. El mucílago (parte central del cladodio de nopal) obtenido se coloca en una bandeja metálica de 30 cm de diámetro por 10 cm de profundidad.

➤ **SECADO:**

El secado se realiza en estufa con ayuda de las bandejas metálicas mencionadas en la etapa anterior a una temperatura de 120°C durante 6 horas, y otras 6 horas a una temperatura de 60 °C, de esta manera la etapa del secado se logra reducir el tiempo de secado.

➤ **MOLIENDA:**

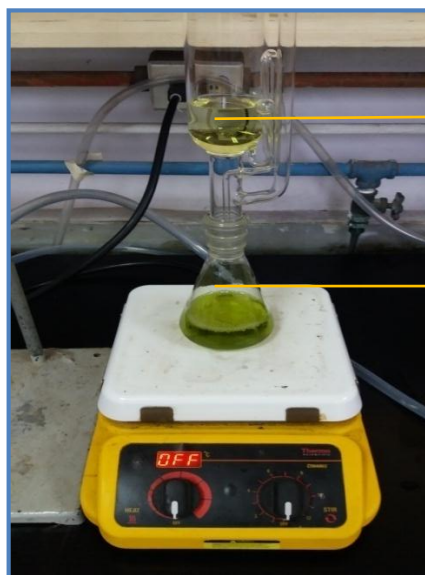
Para la molienda se utilizó una licuadora industrial con cuchillas de acero inoxidable para lograr una reducción de tamaño de partícula del material menor de 0.5 mm. Como producto se obtiene un polvo de color amarillo verdoso, el cual es almacenado en una bolsa plástica para su posterior proceso.

➤ **TAMIZADO:**

El tamizado se realizó una serie de tamices estándar USA #35 con el fin de garantizar que las partículas utilizadas en la etapa posterior tengan un diámetro de partícula inferior a 0.5 mm. El tiempo de tamizado fue de 5 minutos.

➤ **EXTRACCION DE PIGMENTOS:**

Para la extracción de pigmentos, el polvo obtenido en la etapa anterior fue sometido a un proceso de extracción de pigmentos en el equipo Soxhlet (ver figura 3.4) durante un tiempo de 6 horas. Se utilizó etanol al 99% como solvente. Durante este procedimiento el solvente entró en contacto con el material haciendo un cambio de color de incoloro a amarillo; al final de la operación se obtuvo una solución verde oscura que contiene etanol y los pigmentos retirados, y un polvo amarillo (aun con solvente) el cual es el utilizado como floculante.



Materia prima cubierta con papel filtro, sumergida en etanol al 99%.

Pigmentos extraídos de color verde musgo.

Figura 3.3 Equipo Soxhlet

➤ **ELIMINACION DEL SOLVENTE:**

La eliminación de solvente del polvo amarillento obtenido en la etapa anterior, se realizó colocándolo en la estufa a una temperatura de 60°C durante un tiempo de 30 minutos, hasta que el polvo se tornara un color marfil. Seguidamente almacenó en un desecador a temperatura ambiente a temperatura ambiente hasta ser utilizado en pruebas posteriores.

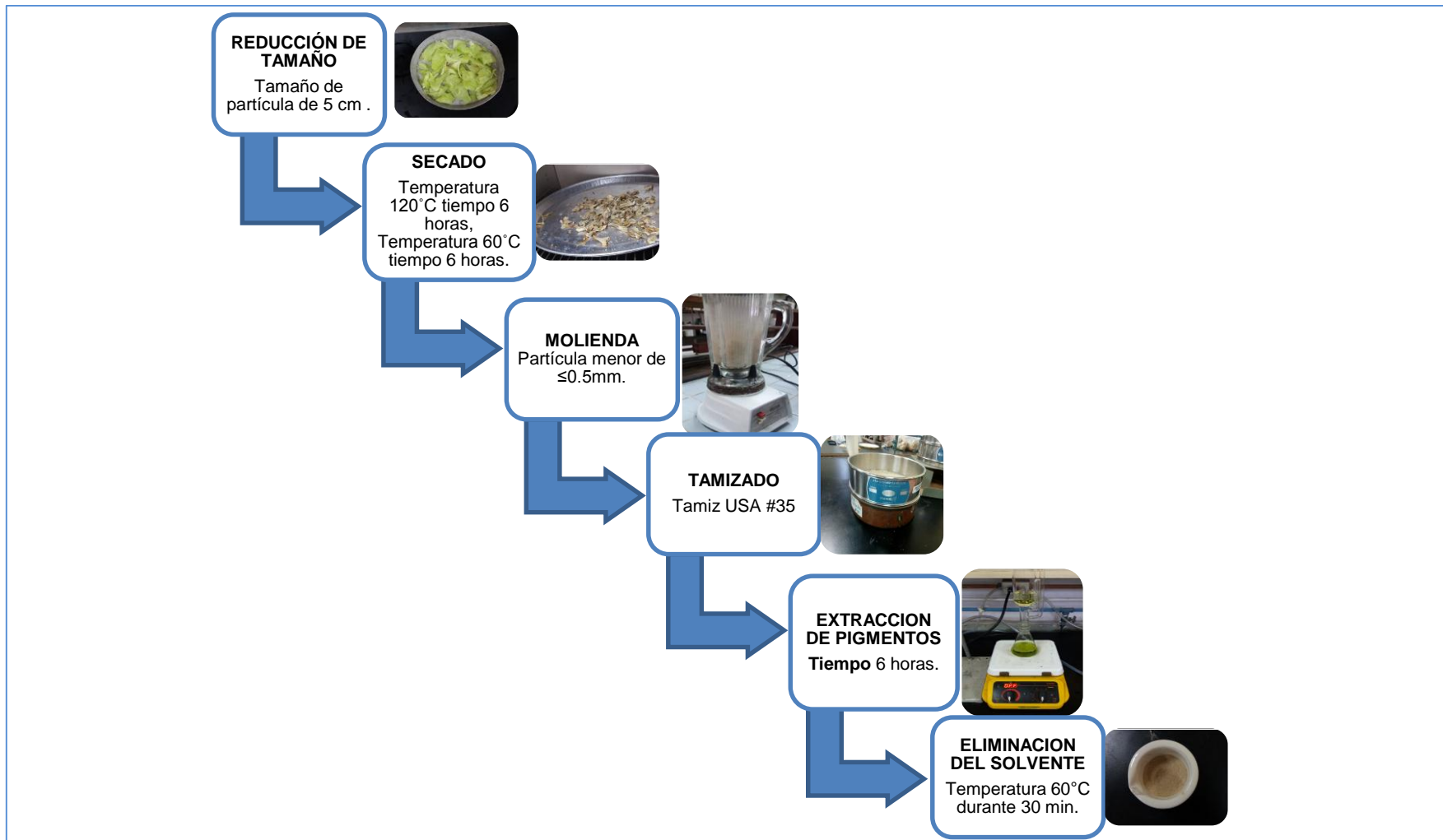


Figura 3.4 Diagrama de flujo de la extracción del floculante del nopal (*Opuntia ficus-indica*).

3.4.2 Determinación de dosis óptima y pH de operación (pruebas preliminares)

➤ Prueba de jarras del nopal (*Opuntia ficus indica*)

Esta prueba se realiza a nivel de laboratorio tomando con la ayuda de una probeta una muestra de 200 ml del agua residual, para luego ser vertida en un beaker de 250 ml.

Para regular el pH del agua residual se instala un hot plate cerca del pH-metro y se agrega ácido sulfúrico mientras el agua residual esta en agitación con el fin de reducir el pH inicial de la muestra, logrando llevar la muestra a diferentes pH. Esta metodología es la realizada durante todas las pruebas.

Con el pH de operación regulado, el agua se mantiene en agitación constante con ayuda de un agitador magnético y un hot plate, para posteriormente agregar la dosis del floculante. Los tiempos de operación utilizados son: 1 minuto de agitación rápida, 20 minutos de agitación lenta y 30 minutos de reposo. Los parámetros de operación utilizados y los resultados obtenidos en la primera prueba pueden observarse en las tablas 3.17, 3.18 y 3.19 respectivamente.

PRUEBA 1: El floculante se preparó disolviendo 1 gramo del floculante de nopal en polvo obtenido después de la eliminación de solvente en 100 ml de agua destilada. Las condiciones iniciales del agua residual pueden observarse en la tabla 3.17.

La primera prueba se realizó a las siguientes condiciones:

Tabla 3.17 Condiciones iniciales de la prueba 1.

pH de la Muestra Cruda	Turbidez Inicial (NTU)	Dosis
9.3	300	5 ml

Fuente: Elaboración propia

Los tiempos de agitación son los mismos utilizados en la prueba 6 del floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)

Tabla 3.18 Resultados de la prueba 1.

pH inicial	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción	pH final
5.5	188.9	37.03%	6.4
6	200.4	33.2%	6.7
6.5	212.2	29.26%	6.8
7	219.2	26.93%	6.9
7.5	240.3	20%	7.1

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla 3.18 se puede observar que el valor de pH óptimo obtenido es de 5.5, una vez obtenido el valor se fijó para encontrar la dosis óptima, como se puede apreciar en la tabla 3.19.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3.19 Resultados de la prueba 1.

Dosis (ml)	Turbidez final	Porcentaje de remoción	pH final de la muestra
6	186.6	37.8%	5.9
8	200	33.33%	6
10	213.2	28.93%	6.1
12	226	24.66%	6.3

Fuente: Elaboración propia

Para la prueba 1, como se observa en la tabla 3.19 los parámetros óptimos para el floculante del nopal (*Opuntia ficus-indica*) en disolución fueron los siguientes:

- ✓ pH óptimo: 5.5.
- ✓ Dosis óptima : 30 mL/L de agua residual
- ✓ Agitación rápida: 1 minuto
- ✓ Agitación lenta: 20 minutos



Figura 3.5 Fotografía de las pruebas realizadas con el floculante del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*).

PRUEBA 2: Una vez obtenido el floculante en polvo fino despigmentado, se preparan 5 porciones de 20 mg cada una en vidrios reloj, para luego ser agregadas a 5 beakers de 250 ml cada uno, cada uno de ellos con 200 ml de agua residual. Manteniendo los tiempos de agitación: 1 minutos de agitación rápida, 20 minutos de agitación lenta y 30 minutos de reposo.

Las condiciones iniciales fueron las siguientes:

Tabla 3.20 Condiciones iniciales de la prueba 2.

pH de la Muestra Cruda	Turbidez Inicial (NTU)	Dosis
9.3	300	20mg

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21 Resultados de la Prueba 2.

pH inicial	Turbidez final	Porcentaje de remoción	pH final
8.1	260.4	13.20%	7.1
7.2	240.5	19.83%	6.6
6.2	214.1	28.63%	6.4
5.1	210.2	29.93%	6.0

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla 3.21 se puede observar que el valor de pH óptimo obtenido es de 5.1, una vez obtenido el valor se fijó para encontrar la dosis óptima, como se puede apreciar en la tabla 3.19.



Figura 3.6 Pruebas con el floculante del nopal (*Opuntia ficus indica*).

Tabla 3.22 Resultados de la prueba 2.

Dosis	Turbidez final	Porcentaje de remoción	pH final
5 mg	269.5	10.16%	6.1
10 mg	209.7	30.10%	6.2
20 mg	215.1	28.30%	6.2
30 mg	226.9	24.37%	6.3
40 mg	232.3	22.56%	6.2
50 mg	250.1	16.63%	6.3

Fuente: Elaboración propia

Los mejores valores obtenidos para el floculante del nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la prueba 2 como se aprecia en la tabla 3.22 fueron los siguientes:

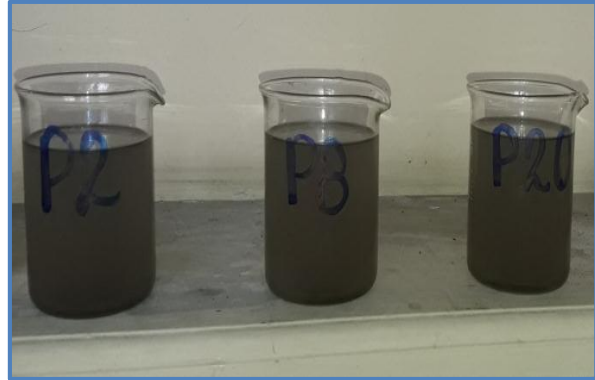
- ✓ pH óptimo: 5.1.
- ✓ Dosis óptima: 50 mg/L
- ✓ Agitación rápida: 1 minuto
- ✓ Agitación lenta: 20 minutos

Sin embargo a pesar de haber logrado un 30.10 % de remoción de turbidez, no logra superar el 37.10 % de remoción de turbidez logrado en la prueba 1 utilizando floculante de nopal en solución. Por lo que en el diseño de experimento (ver capítulo 4) se prefiere utilizar floculante a partir de cladodio de nopal en solución.

La comparativa entre el uso de floculante a partir nopal en estado de solución vs floculante en polvo se puede apreciar en forma gráfica en la figura siguiente:



Aplicando floculante del nopal (*Opuntia ficus-indica*) en solución.



Aplicando floculante del nopal (*Opuntia ficus-indica*) en polvo.

Figura 3.7 Imágenes comparativas de la aplicación de floculante de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en solución y en polvo.

Una de las ventajas que se observaron en las pruebas preliminares de los floculantes naturales es que al ser agregados no afectan significativamente el pH del agua tratada, por lo cual es un factor a tomar en cuenta en el cumplimiento de las normativas salvadoreñas: Norma Salvadoreña de descarga a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09 y la Norma de descarga de agua residual al alcantarillado sanitario de ANDA.

CAPITULO 4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El método a considerar para la evaluación de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) y del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) como floculantes es la prueba de jarras, en la que se simula a nivel de laboratorio el proceso de floculación.

El procedimiento experimental para evaluar el funcionamiento de los floculantes naturales en el tratamiento de aguas residuales se planificó como un diseño de experimentos de tres factores del tipo 3^3 , en el que los factores a evaluar son el tiempo de agitación, el pH y la variación en la cantidad de floculante a agregar (Dosis); y la variable respuesta fue la fracción de remoción de la turbidez en las muestras de agua turbia provenientes de lavandería industrial. (Ver tabla 4.1 y tabla 4.6).

Para el análisis y posterior discusión de resultados se utilizaran los modelos de diseño de experimentos, los cuales son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en una variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificar dicha influencia.

4.1 Análisis de resultados con el floculante de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*).

Para determinar las condiciones de operación en la simulación del proceso de floculación se instaló un equipo, el cual consistía de 5 hot-Plate con 27 beaker de 250 ml, los cuales fueron colocados en 5 series de 5 y una serie de 2, asegurándose que cada serie de beakers cuente con sus respectivos agitadores magnéticos (los cuales permitían que se realizara la agitación continuamente).

En cada beaker se agregó igual cantidad de agua residual (200 ml) la cual sería tratada con el floculante a partir de cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*), agregando diferente dosificación de floculante, a diferentes pH de operación y a diferentes tiempos de agitación, según el diseño de experimento mostrado en la tabla 4.2.

La metodología utilizada para la evaluación de sólidos suspendidos totales (SST) fue realizada en el laboratorio a las 27 pruebas propuestas en el diseño de experimento. (Ver anexo 4.1).

Tabla 4.1 Niveles de los factores experimentales y variable de respuesta.

Factores	Niveles	Variable de respuesta
Dosis de coagulante agregado	1.2 ml	$\frac{(\text{Turbidez inicial}) - (\text{Turbidez final})}{(\text{Turbidez inicial})}$
	1.6 ml	
	2.0 ml	
PH de operación	5	
	5.5	
	6	
Tiempos de Agitación	10 min	
	20 min	
	30 min	

Fuente: Elaboración propia

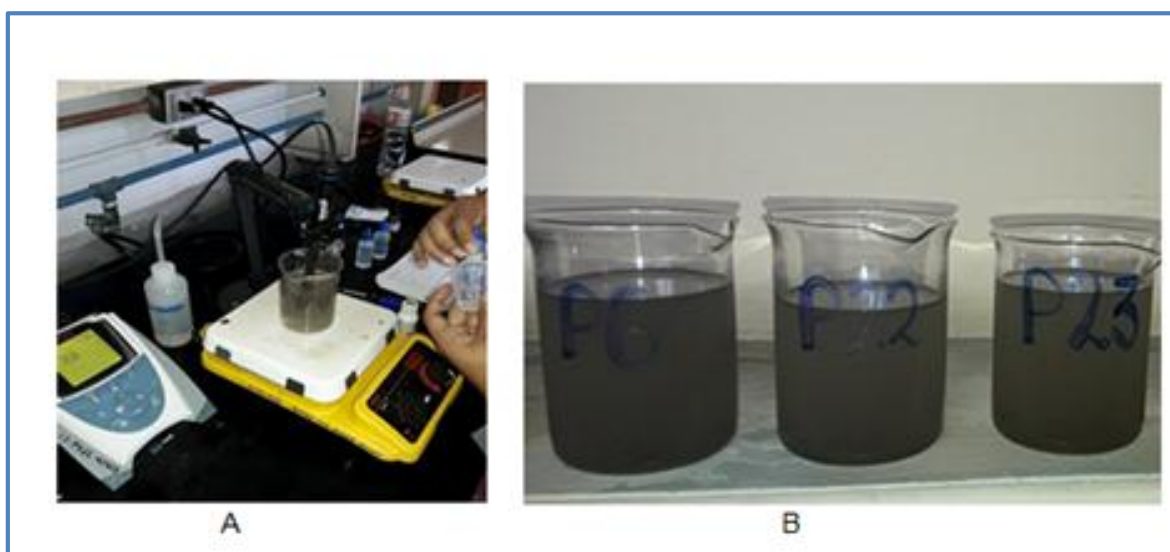


Figura 4.1 **A)** Ajuste de pH de operación antes de la adición del floculante. **B)** Agua después del tratamiento con floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)

Los resultados del diseño factorial del tipo 3³ utilizando floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) pueden observarse en la tabla a continuación:

Tabla 4.2 Resultados obtenidos experimentalmente para el diseño factorial del tipo 3³ utilizando floculante de semilla de tamarindo.

Prueba	Tiempo de agitación (min)	Dosis (ml)	PH inicial	PH final	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	Fracción de Remoción	SST Inicial (mg/L)	SST Final (mg/L)
1	10	1,2	5	5	300	184	0,3867	430	228
2	10	1,6	5	5	300	140,1	0,5330	430	152
3	10	2,0	5	5,2	300	143	0,5233	430	158
4	20	1,2	5	5	300	170	0,4333	430	204
5	20	1,6	5	5	300	134	0,5533	430	142
6	20	2,0	5	5,2	300	140,2	0,5327	430	153
7	30	1,2	5	5	300	172	0,4267	430	208
8	30	1,6	5	5	300	135	0,5500	430	144
9	30	2,0	5	5,2	300	140	0,5333	430	152
10	10	1,2	5,5	5,5	300	230,2	0,2327	430	308
11	10	1,6	5,5	5,5	300	159	0,4700	430	185
12	10	2,0	5,5	5,4	300	160	0,4667	430	187
13	20	1,2	5,5	5,5	300	220,8	0,2640	430	292
14	20	1,6	5,5	5,5	300	142	0,5267	430	156
15	20	2,0	5,5	5,4	300	144	0,5200	430	160
16	30	1,2	5,5	5,5	300	221	0,2633	430	292
17	30	1,6	5,5	5,5	300	141,6	0,5280	430	155
18	30	2,0	5,5	5,4	300	142,9	0,5237	430	158
19	10	1,2	6	5,9	300	240,3	0,1990	430	325
20	10	1,6	6	5,8	300	210	0,3000	430	273
21	10	2,0	6	5,7	300	215,5	0,2817	430	281
22	20	1,2	6	5,9	300	225,5	0,2483	430	300
23	20	1,6	6	5,8	300	190,9	0,3637	430	240
24	20	2,0	6	5,7	300	200,2	0,3327	430	256
25	30	1,2	6	5,9	300	221,5	0,2617	430	293
26	30	1,6	6	5,8	300	179,8	0,4007	430	221
27	30	2,0	6	5,7	300	195	0,3500	430	247

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 4.2 y 4.3 se observa el proceso de floculación y los resultados después del tratamiento del agua residual, utilizando floculante a partir de semilla de tamarindo. En la figura 4.3 cabe resaltar que lo importante era tomar una muestra de agua residual, sin importar el tamaño de la alícuota.

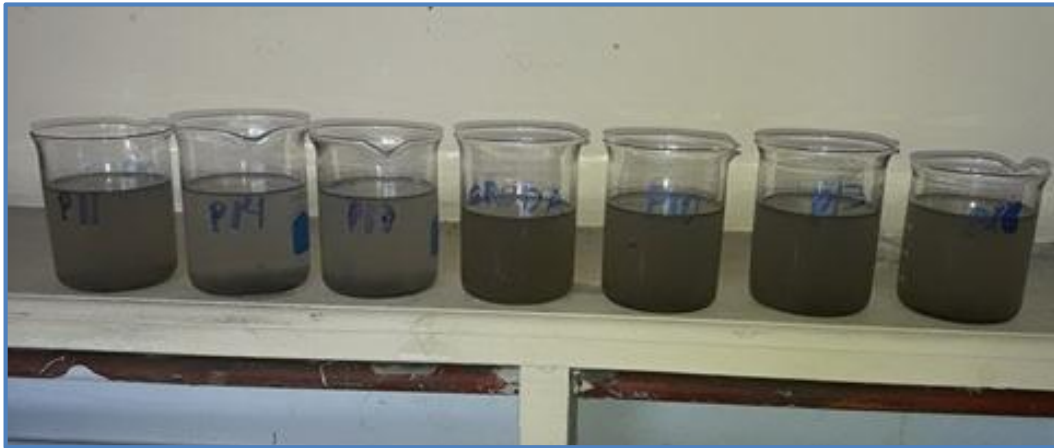


Figura 4.2 Agua residual tratada con floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*).



Figura 4.3 Toma de agua residual después del tratamiento, para su posterior análisis de turbidez.

La reducción de la turbidez y los SST en el agua residual después del tratamiento pueden observarse en las figuras 4.4 y 4.5 a continuación:

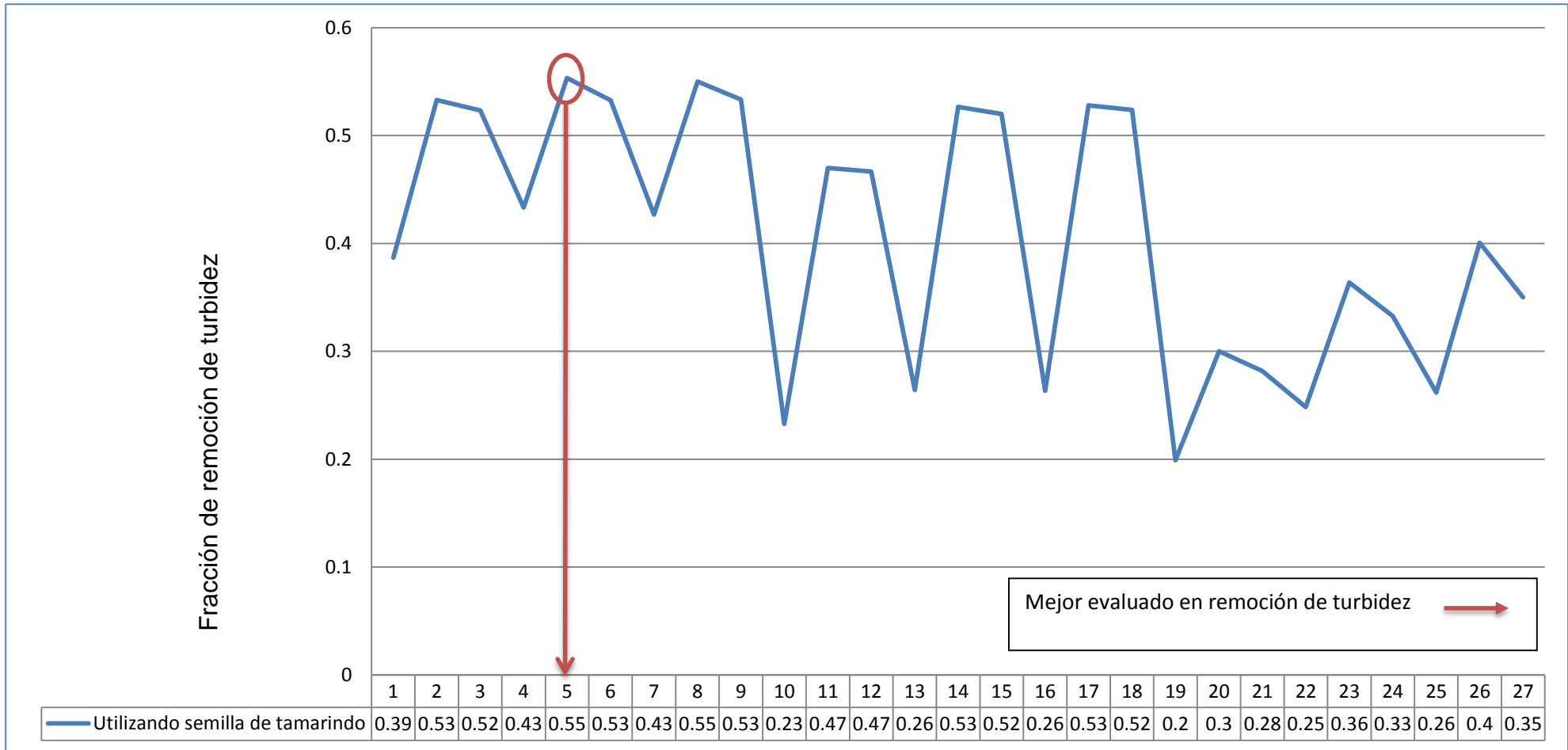


Figura 4.4 Fracción de remoción utilizando flocculante a partir de semilla de tamarindo

Fuente: Elaboración propia

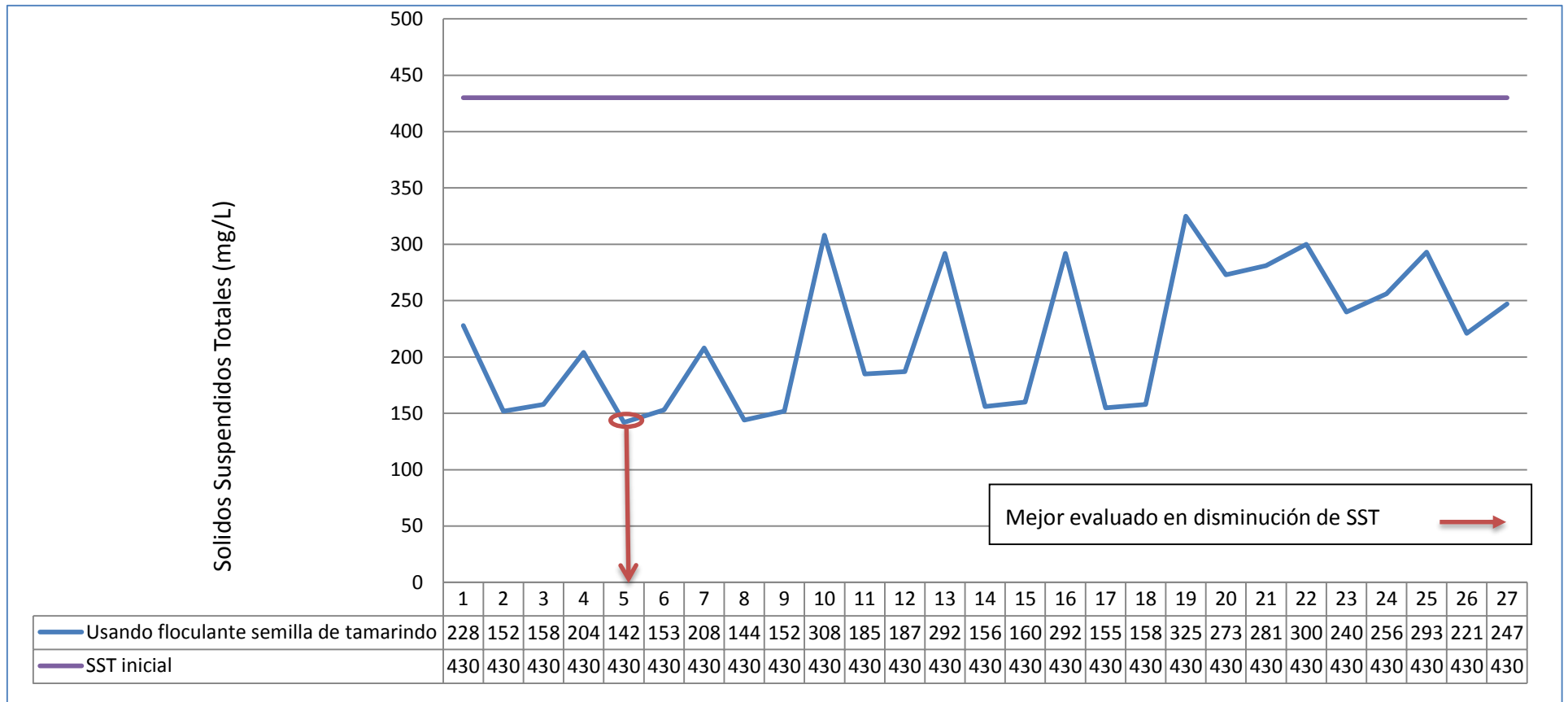


Figura 4.5 Reducción en los SST utilizando floculante a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)

Fuente: Elaboración Propia

A partir de la tabla 4.2 y las figuras 4.4 y 4.5 se determina que el valor óptimo de remoción de turbidez y reducción en SST se dio en la prueba número 5. Con un pH de operación de 5, dosis de floculante de 1.6 mL/200 mL y 20 minutos de agitación.

En la tabla 4.3 se presenta un análisis estadístico que nos muestra el grado de significancia de los factores en la remoción de turbidez.

Tabla 4.3 Análisis de Varianza para fracción de remoción de turbidez.

Efectos	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Dosis	0,10101	1	0,10101	61,38	0,0000
B:Tiempo de agitación	0,0109668	1	0,0109668	6,66	0,0194
C:PH de operación	0,167138	1	0,167138	101,56	0,0000
AA	0,0517082	1	0,0517082	31,42	0,0000
AB	3,33333E-7	1	3,33333E-7	0,00	0,9888
AC	0,000633653	1	0,000633653	0,39	0,5431
BB	0,00188328	1	0,00188328	1,14	0,2997
BC	0,00226051	1	0,00226051	1,37	0,2574
CC	0,00267548	1	0,00267548	1,63	0,2194
Error total	0,0279762	17	0,00164566		
Total (corr.)	0,366253	26			
R- cuadrada = 92.3615 %					
R- cuadrada (ajuste por g.l.) =88.3176 %					
Error Estándar del est. = 0.0405667					
Error absoluto medio = 0.027929					
Estadístico Durbin- Watson = 1.44097 (P=0.0619)					
Auto correlación residual de Lag 1 = 0.253609					

Fuente: Elaboración propia

Los P-valor representados en la tabla 4.3 indican el grado de significancia que tienen los factores (pH, dosis y tiempo) en la remoción de turbidez, si dichos

valores son menores a 0.05 significa que el grado de significancia es alto, por lo que dichos factores influyen directamente en la remoción de turbidez. Los resultados obtenidos muestran que tanto la dosis, el tiempo de agitación, y el pH afectan significativamente al porcentaje de remoción de la turbidez a un nivel de significancia del 5%. Eso puede apreciarse en las figuras 4.6 y 4.7.

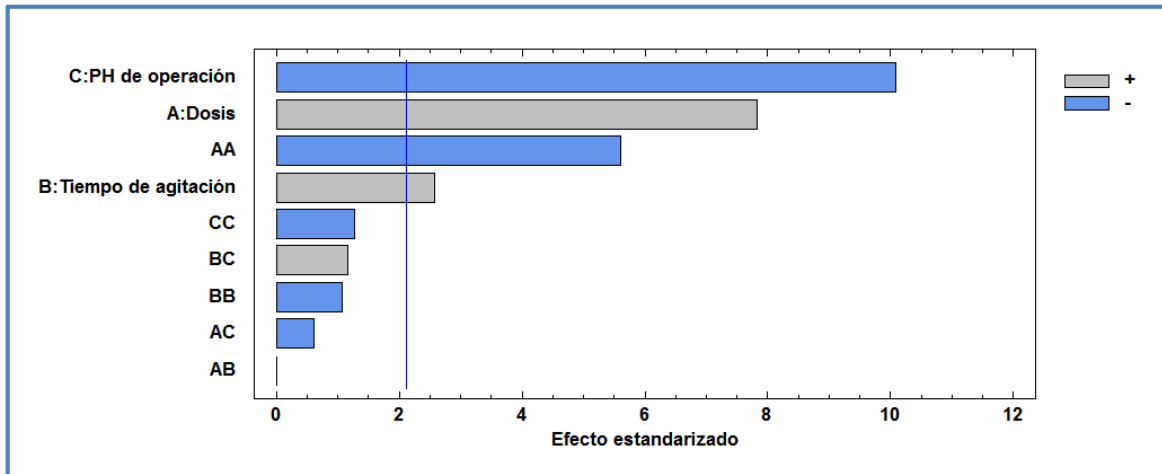


Figura 4.6 Diagrama de Pareto estandarizado para la fracción de remoción de turbidez.

Fuente: Elaboración propia

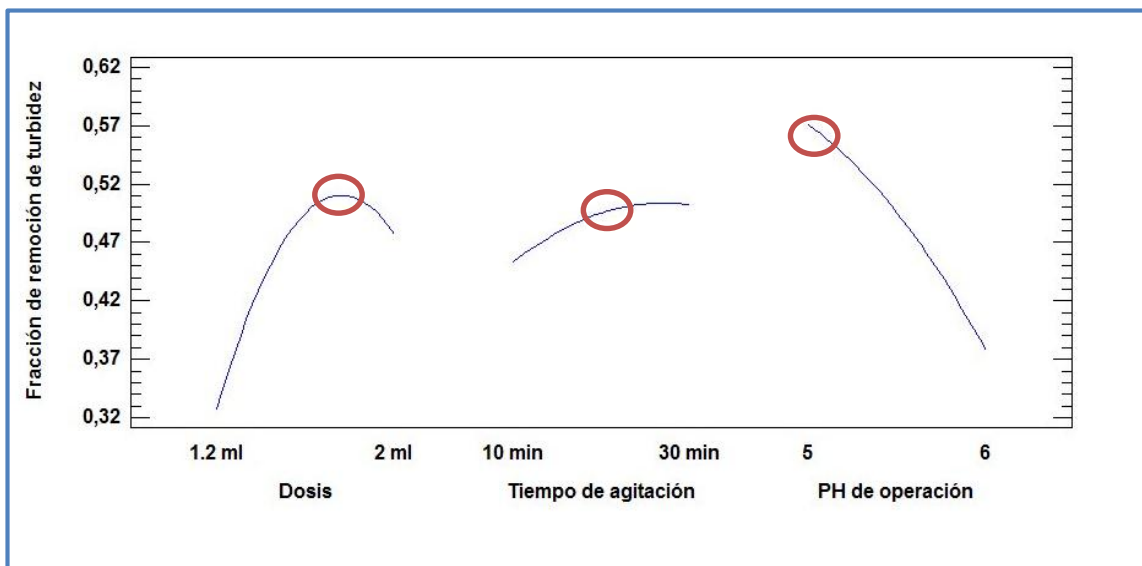


Figura 4.7 Efectos principales para la remoción de turbidez.

Fuente: Elaboración propia

Parámetros óptimos ○

La figura 4.7 corroborará que la mayor remoción de turbidez se dio a una dosis de 1.6 ml de floculante por 200 ml de agua residual, 20 minutos de agitación y un pH de operación de 5.

La figura 4.8 muestra que no hay interacciones significativas entre las variables: dosis, pH y tiempo de agitación; lo que significa que sus interacciones no presentan un grado de significancia en la remoción de turbidez. La figura 4.9 muestra que modelo lineal de efectos no captura un posible efecto cuadrático o cúbico de uno de los factores; según figura 4.6 el que tiene una mayor probabilidad es el efecto de la dosis.

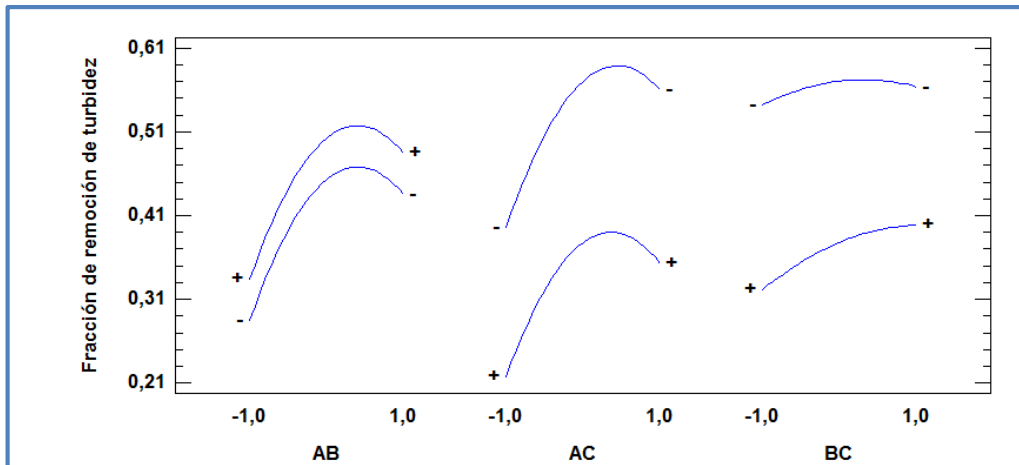


Figura 4.8 Interacción para fracción de remoción de turbidez.
Fuente: Elaboración Propia

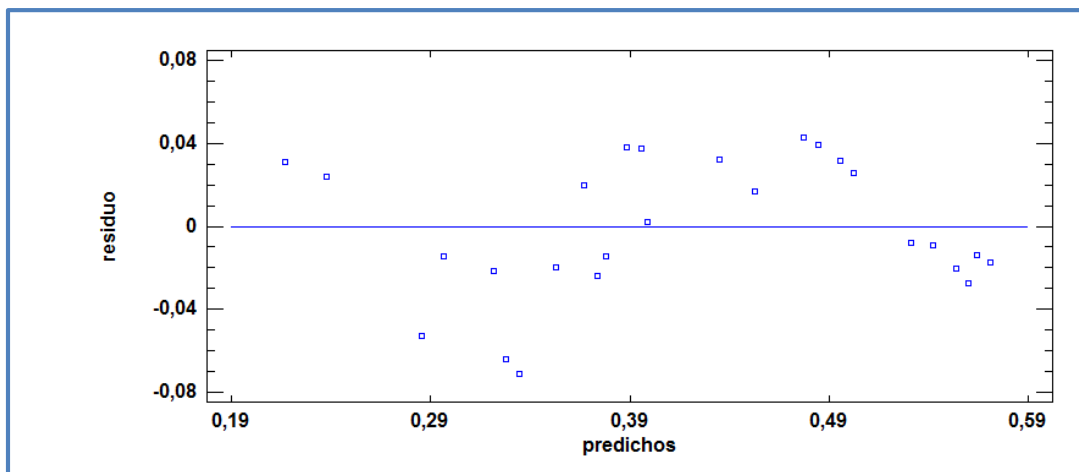


Figura 4.9 Residuos vs valores predichos para el modelo de fracción de remoción de turbidez.
Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Selección de los parámetros óptimos de operación para el floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)

Los criterios para seleccionar los parámetros óptimos de operación (dosis, pH de operación y dosis óptima) para el floculante a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) fueron en base al porcentaje de remoción de turbidez y la disminución en los sólidos suspendidos totales (SST). Luego de realizar el diseño de experimentos se apreció en la tabla 4.2, y en los gráficos 4.1 y 4.2 que en la prueba número 5 se obtuvieron los mejores resultados, lográndose una remoción de turbidez del 55.33% y una disminución de SST hasta 142 mg/L bajo las siguientes condiciones:

Tabla 4.4 Parámetros óptimos de operación para el floculante a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)

PH de operación	5
Dosis Optima	8 ml de floculante/L agua residual
Tiempo de agitación	20 minutos

Fuente: Elaboración Propia

Establecidos los parámetros óptimos de operación, se procedió a tomar una muestra del agua una vez tratada con el floculante y se llevó al El Centro de Investigación y Desarrollo en Salud (CENSALUD) para el análisis de DBO y DQO .Los resultados de dichos análisis pueden apreciarse en la tabla 4.10. (Ver Anexo 4.3).

4.1.3 Evaluación el cumplimiento de las normativas salvadoreñas del agua tratada con floculante a partir de semilla de tamarindo

Las normas para la descarga de agua residual establecen las características y valores físico-químicos, microbiológicos y radioactivos permisibles que deben presentar el agua residual para proteger y rescatar los cuerpos receptores.

Se evaluaron el cumplimiento de 4 parámetros establecidos en las normativas salvadoreñas: **NSO 13.49.01:09 “Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor”** y la norma **“NORMA PARA REGULAR CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL DESCARGADAS AL ALCANTARILLADO SANITARIO”**. Los cuales son: DBO_{5,20}, DQO, SST y pH.

Los resultados después del tratamiento y su comparación se presentan en la tabla 4.5. Los resultados fisicoquímicos del agua residual antes del tratamiento se presentan en el anexo 4.2.

Tabla 4.5 Comparación del agua después del tratamiento con los valores máximo permisibles según las normativas salvadoreñas.

PARÁMETROS A EVALUAR	VALORES OBTENIDOS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO	VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES SEGÚN NORMA		DIFERENCIA CON RESPECTO A NORMA	
		NSO 13.49.01:09	ANDA	NSO 13.49.01:09	ANDA
DBO _{5,20} (mg/L)	150	100	400	+50	-250
DQO (mg/L)	478.5	300	1000	+178.5	-521.5
SST (mg/L)	144	100	450	+44	-306
PH	5	5.5-9	5.5-9	Fuera del rango	Fuera del rango
TEMPERATURA	25	-	20-35°C	N/A	Dentro del rango

- Diferencia negativa indica que los valores están por debajo de los máximos permisibles

+ Diferencia positiva indica que los valores están sobre los máximos permisibles

Fuente: Elaboración propia

En los gráficos 4.10 y 4.11 puede apreciarse una comparativa de los resultados obtenidos utilizando floculante a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) con las normativas salvadoreñas NSO 13.49.01:09 “Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor” y la “NORMA PARA REGULAR CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL DESCARGADAS AL ALCANTARILLADO SANITARIO”

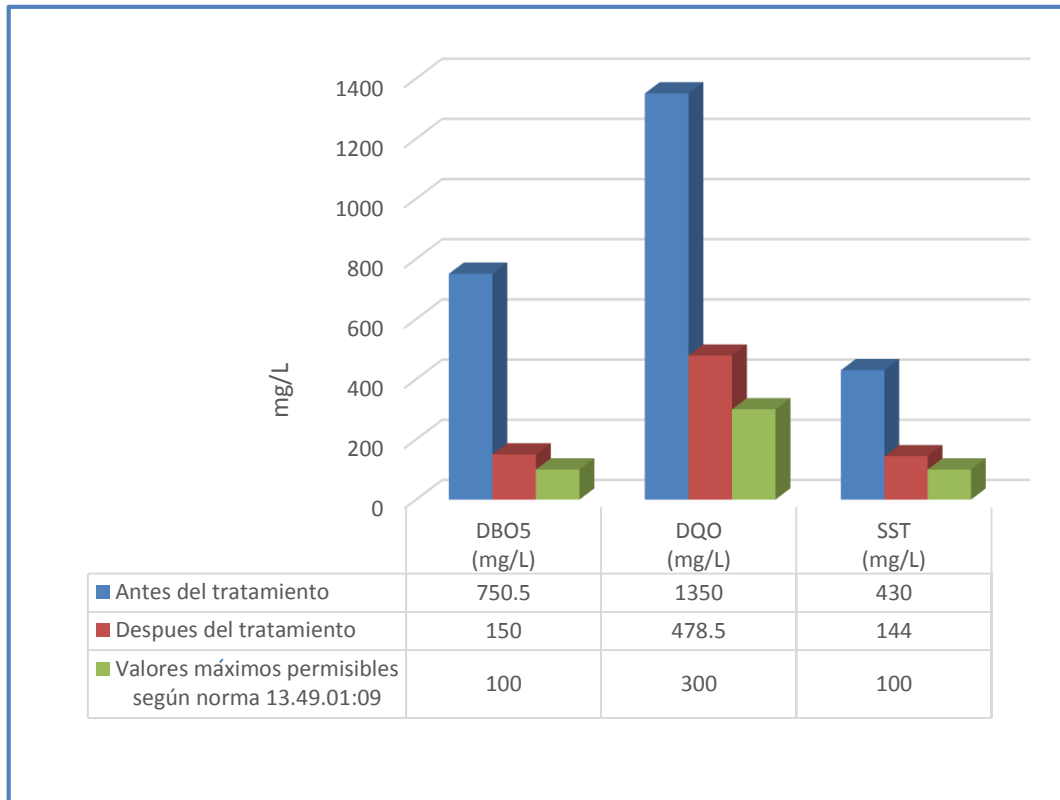


Figura 4.10 Comparación de resultados con la norma NSO 13.49.01:09 utilizando floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos se determina que el agua residual tratada con floculante a partir de semilla de tamarindo no cumple con la normativa salvadoreñas NSO 13.49.01:09 “Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor”, por lo que el agua tratada con este floculante no podría ser descargada a un cuerpo receptor.

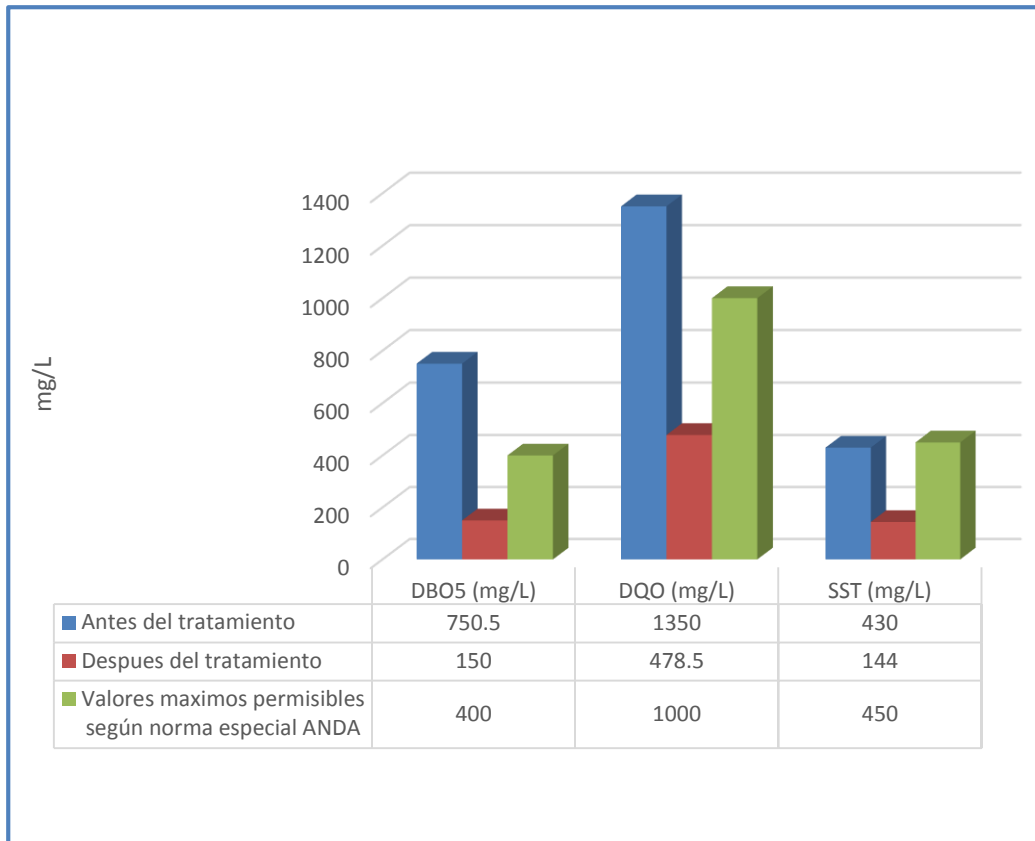


Figura 4.11 Comparación de resultados con la norma especial de ANDA utilizando floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)
 Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos se determina que el agua residual tratada con floculante a partir de semilla de tamarindo está bajo los parámetros máximos permisibles por la “NORMA PARA REGULAR CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL DESCARGADAS AL ALCANTARILLADO SANITARIO” por lo que podría ser descargada en el alcantarillado de ANDA.

4.2 Análisis de resultados con el floculante del cladodio del nopal (*Opuntia ficus indica*).

Para determinar las condiciones de operación en la simulación del proceso de floculación se instaló un equipo, el cual consistía de 5 hot-Plate con 27 beaker de 250 ml, los cuales fueron colocados en 5 series de 5 y una serie de 2, asegurándose que cada serie de beakers cuente con sus respectivos agitadores magnéticos (los cuales permitían que se realizara la agitación continuamente).

En cada beaker se agregó igual cantidad de agua residual (200 ml) la cual sería tratada con el floculante a partir de cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*), agregando diferente dosificación de floculante, a diferentes pH de operación y a diferentes tiempos de agitación, según el diseño de experimento mostrado en la tabla 4.7.

La metodología utilizada para la evaluación de Sólidos Suspendedos Totales (SST) fue realizada en el laboratorio a las 27 pruebas propuestas en el diseño de experimento. (Ver anexo 4.1).

Tabla 4.6 Niveles de los factores experimentales y variable de respuesta

Factores	Niveles	Variable de respuesta
Dosis de coagulante agregado	3 ml	Fracción de remoción $\frac{(Turbidez\ inicial) - (Turbidez\ final)}{(Turbidez\ inicial)}$
	6 ml	
	9 ml	
pH de operación	5	
	6	
	7	
Tiempos de Agitación	10 min	
	20 min	
	30 min	

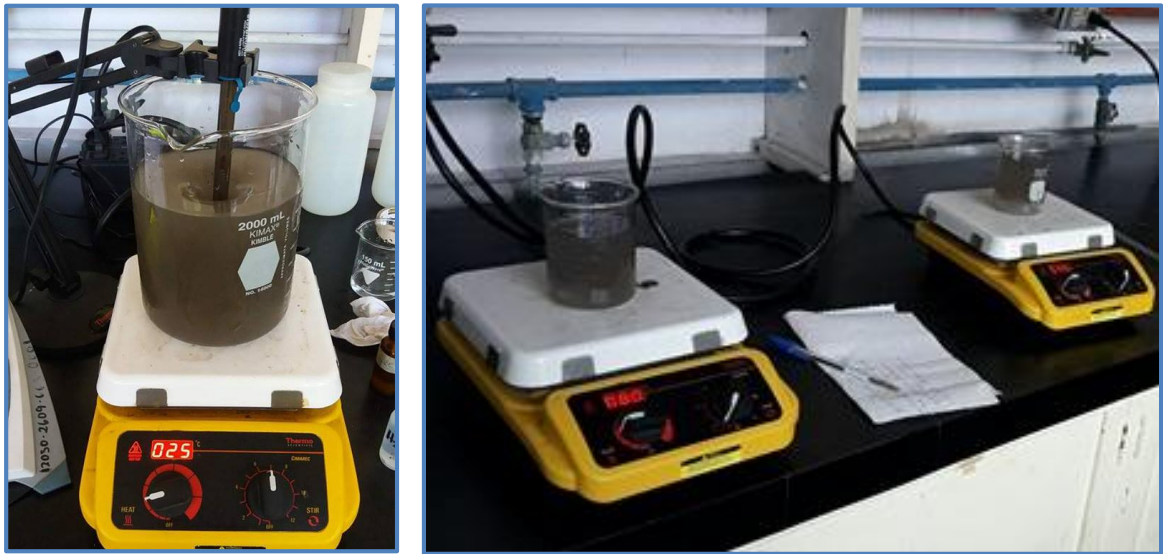
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.7 Resultados obtenidos experimentalmente para el diseño factorial del tipo 3³ utilizando floculante a partir de nopal.

Prueba	Tiempo de agitación (min)	Dosis (ml)	PH inicial	PH final	Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez Final (NTU)	Fracción de Remoción	SST Inicial (mg/L)	SST Final (mg/L)
1	10	3	5	5.8	300	200.5	0.3317	430	257
2	10	6	5	5.9	300	192.4	0.3587	430	243
3	10	9	5	5.9	300	220	0.2667	430	290
4	20	3	5	5.8	300	191.5	0.3617	430	241
5	20	6	5	5.9	300	187.8	0.3740	430	235
6	20	9	5	5.9	300	200	0.3333	430	256
7	30	3	5	5.8	300	192	0.3600	430	242
8	30	6	5	5.9	300	188.5	0.3717	430	236
9	30	9	5	5.9	300	199.5	0.3350	430	255
10	10	3	6	6	300	190	0.3667	430	239
11	10	6	6	6.2	300	186.6	0.3780	430	233
12	10	9	6	6.3	300	196.3	0.3457	430	250
13	20	3	6	6	300	187.2	0.3760	430	234
14	20	6	6	6.2	300	179	0.4033	430	220
15	20	9	6	6.3	300	195.2	0.3493	430	248
16	30	3	6	6	300	186.3	0.3790	430	232
17	30	6	6	6.2	300	180.3	0.3990	430	222
18	30	9	6	6.3	300	196.1	0.3463	430	249
19	10	3	7	6.8	300	210	0.3000	430	273
20	10	6	7	6.9	300	217.7	0.2743	430	286
21	10	9	7	7	300	218	0.2733	430	287
22	20	3	7	6.8	300	206.7	0.3110	430	267
23	20	6	7	6.9	300	208	0.3067	430	270
24	20	9	7	7	300	200.5	0.3317	430	257
25	30	3	7	6.8	300	206.8	0.3107	430	268
26	30	6	7	6.9	300	214.9	0.2837	430	282
27	30	9	7	7	300	201.6	0.3280	430	259

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 4.12 y 4.13 se observa el desarrollo del diseño de experimento utilizando floculante a partir de cladodio de nopal.



A

B

Figura 4.12 A) Ajuste de pH de operación antes de la adición del floculante. B) Agitación del agua en hot-Plate después de agregar el floculante a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*).



Figura 4.13 Pruebas realizadas en el diseño de experimento utilizando floculante a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*).

La reducción de la turbidez y los SST en el agua residual después del tratamiento pueden observarse en las figuras 4.14 y 4.15.

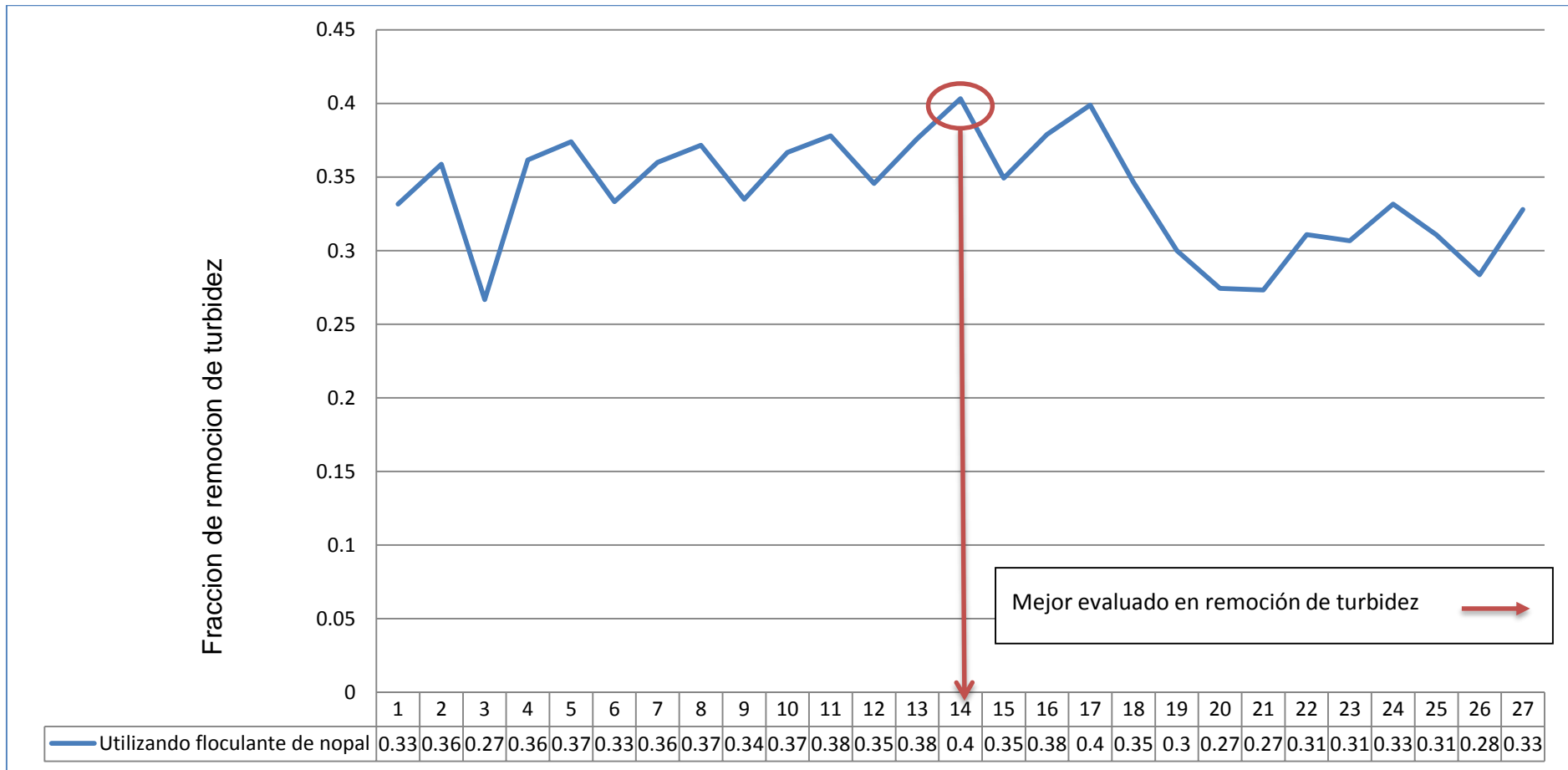


Figura 4.14 Fracción de remoción de turbidez utilizando floculante a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*)
 Fuente: Elaboración propia

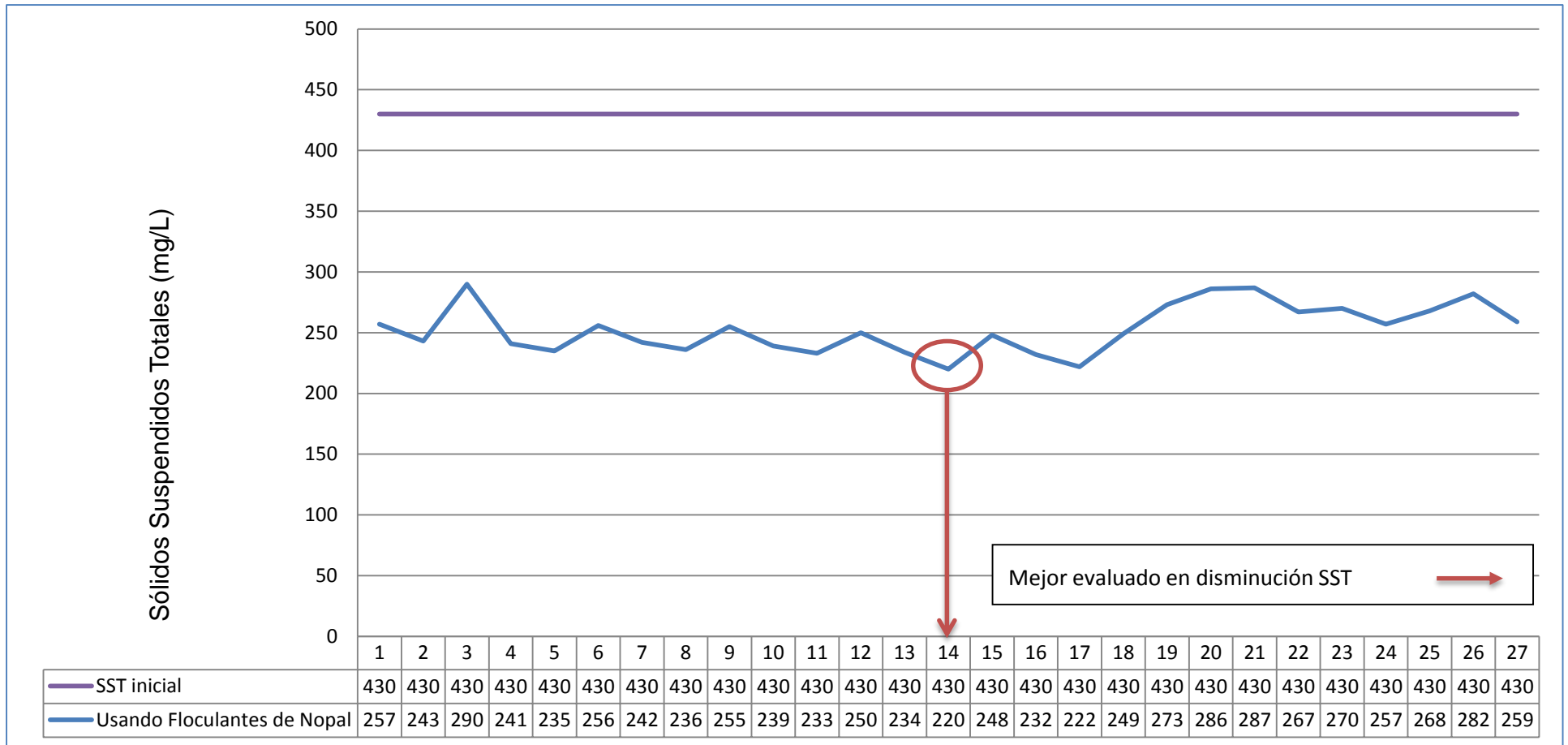


Figura 4.15 Reducción en los SST utilizando floculante a partir de cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*)
 Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla 4.7 y las figuras 4.14 y 4.15 se determina que el valor óptimo de remoción de turbidez y reducción en SST se dio en la prueba número 14. Con un pH de operación de 6, dosis de floculante de 1.6 mL/200 mL y 20 minutos de agitación.

En la tabla 4.8 se presenta un análisis estadístico que nos muestra el grado de significancia de los factores en la remoción de turbidez.

Tabla 4.8 Análisis de varianza para fracción de remoción de turbidez.

ORIGEN DE LAS VARIACIONES	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	PROMEDIO DE LOS CUADRADOS	F	PROBABILIDADES
A: Dosis	0.00195313	1	0.00195313	5.10	0.0373
B:Tiempo	0.00264749	1	0.00264749	6.92	0.0176
C:Ph	0.00774598	1	0.00774598	20.23	0.0003
AA	0.00158654	1	0.00158654	4.14	0.0577
AB	0.000435608	1	0.000435608	1.14	0.3010
AC	0.00140184	1	0.00140184	3.66	0.0727
BB	0.00150945	1	0.00150945	3.94	0.0634
BC	0.00010092	1	0.00010092	0.26	0.6143
CC	0,0141588	1	0.0141588	36.99	0.000
Error total	0.00650794	17	0.00038282		
Total (corr.)	0.0380477	26			
R- cuadrada = 82.8953 %					
R- cuadrada (ajuste por g.l.) = 73.8399%					
Error Estándar del est. = 0.0195658					
Error absoluto medio = 0.0130853					
Estadístico Durbin- Watson = 2.13231 (P=0.7476)					
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.184612					

Fuente: Elaboración propia

Los P-valor representados en la tabla 4.8 indican el grado de significancia que tienen los factores (pH, dosis y tiempo) en la remoción de turbidez, si dichos valores son menores a 0.05, significa que el grado de significancia es alto, por lo que dichos factores influyen directamente en la remoción de turbidez. Los

resultados obtenidos muestran que tanto la dosis, el tiempo de agitación, y el PH afectan significativamente al porcentaje de remoción de la turbidez a un nivel de significancia del 5%. Eso puede apreciarse en las figuras 4.16 y 4.17.

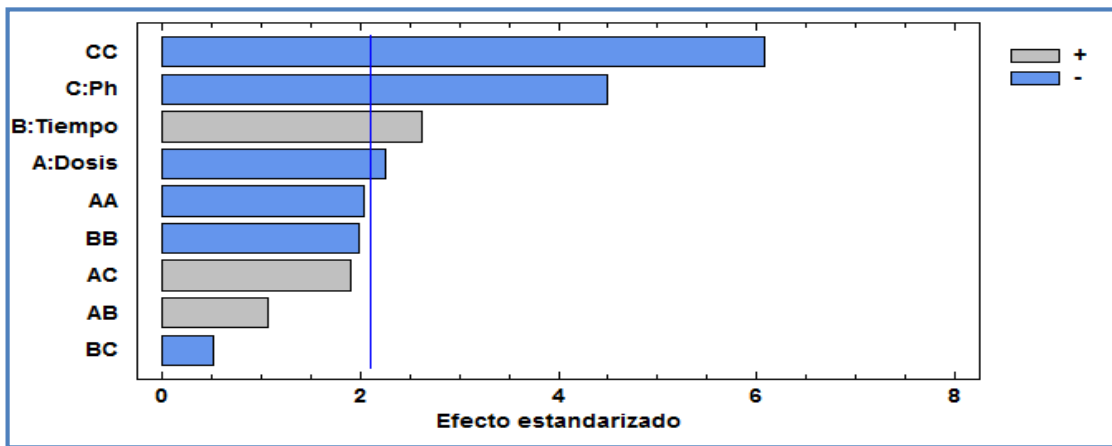


Figura 4.16 Diagrama de Pareto estandarizado para la fracción de remoción
Fuente: Elaboración propia

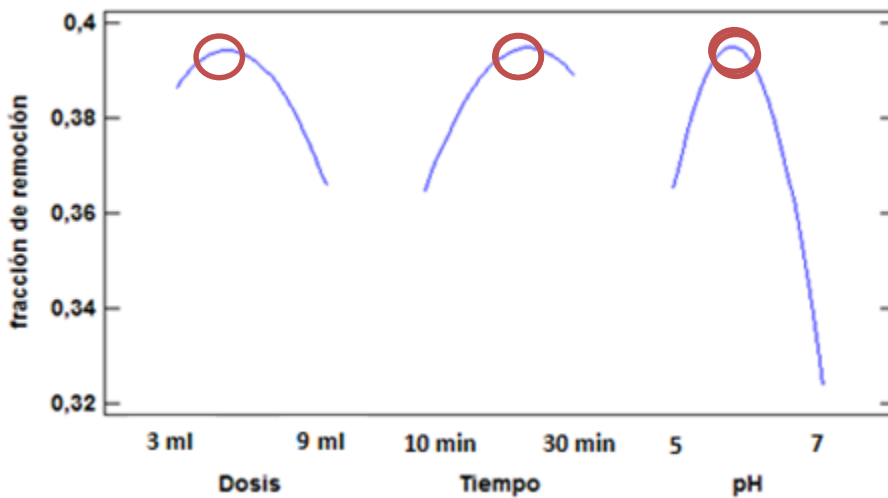


Figura 4.17 Efectos principales para la remoción de turbidez. Parámetros óptimos ○
Fuente: Elaboración propia

La figura 4.17 corrobora que la mayor remoción de turbidez se dio a una dosis de 6 ml de floculante por 200 ml de agua residual, 20 minutos de agitación y un pH de operación de 6.

La figura 4.18 muestra que no hay interacciones significativas entre las variables: dosis, pH y tiempo de agitación; lo que significa que sus interacciones no presentan un grado de significancia en la remoción de turbidez. La figura 4.9 muestra que el modelo lineal de efectos si captura la relación entre la fracción de remoción y los efectos: dosis, pH y tiempo de agitación.

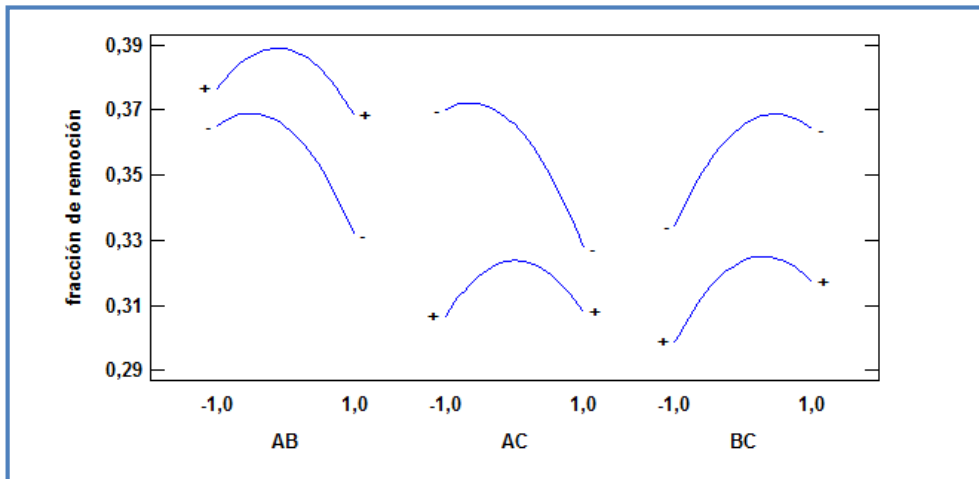


Figura 4.18 Interacción para fracción de remoción de turbidez
Fuente: Elaboración propia

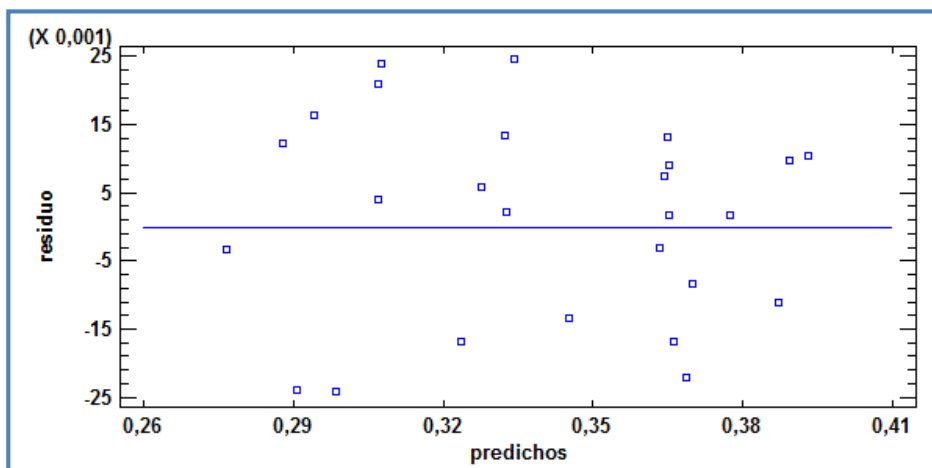


Figura 4.19 Residuos vs valores predichos para el modelo de fracción de remoción de turbidez.
Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Selección de los Parámetros Óptimos de Operación para el Floculante a Partir Nopal (*Opuntia ficus indica*)

Los criterios para seleccionar los parámetros óptimos de operación (dosis, ph de operación y dosis óptima) para el floculante a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*) fueron en base al porcentaje de remoción de turbidez y la disminución en los sólidos suspendidos totales (SST). Luego de realizar el diseño de experimentos se apreció en la tabla 4.6, y en los gráficos 4.9 y 4.10 que en la prueba número 14 se obtuvieron los mejores resultados, lográndose una remoción de turbidez del 40.3 % y una disminución de SST hasta 220 mg/L bajo las siguientes condiciones:

Tabla 4.9 Parámetros óptimos de operación para el floculante a partir de Nopal (*Opuntia ficus indica*)

PH de operación	6
Dosis Optima	30 ml de floculante/L agua residual
Tiempo de agitación	20 minutos

Fuente: Elaboración Propia

Establecidos los parámetros óptimos de operación, se procedió a tomar una muestra del agua una vez tratada con el floculante y se llevó al El Centro de Investigación y Desarrollo en Salud (CENSALUD) para el análisis de DBO y DQO. Los resultados de dichos análisis pueden apreciarse en la tabla 4.10. (Ver Anexo 4.4).

4.2.2 Evaluación del cumplimiento de las normativas salvadoreñas utilizando floculante a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*).

Al igual que para el floculante a partir de la semilla de tamarindo, es importante comparar los resultados del agua residuales después del tratamiento con las normas establecidas.

Se evaluaron el cumplimiento de 4 parámetros establecidos en las normativas salvadoreñas: **NSO 13.49.01:09 “Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor”** y la norma **“NORMA PARA REGULAR CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL DESCARGADAS AL ALCANTARILLADO SANITARIO”**. Los cuales son: DBO_{5,20}, DQO, SST y pH.

Los resultados después del tratamiento y su comparación se presentan en la tabla 4.5.

Tabla 4.10 Comparación del agua después del tratamiento con los valores máximo permisibles según la norma NSO 13.49.01:09

Parámetros a evaluar	Valores Obtenidos después del tratamiento	Valores Máximos permisibles según Norma		DIFERENCIA CON RESPECTO A NORMA	
		NSO 13.49.01:09	ANDA	NSO 13.49.01:09	ANDA
DBO _{5,20} (mg/L)	220	100	400	+50	-250
DQO (mg/L)	638.5	300	1000	+178.5	-521.5
SST (mg/L)	224	100	450	+44	-306
PH	6	5.5-9	5.5-9	Dentro del rango	Dentro del rango

- Diferencia negativa indica que los valores están por debajo de los máximos permisibles

+ Diferencia positiva indica que los valores están sobre los máximos permisibles

Fuente: Elaboración propia

En los gráficos 4.20 y 4.21 puede apreciarse una comparativa de los resultados obtenidos utilizando floculante a partir de cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*) con las normativas salvadoreñas NSO 13.49.01:09 “Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor” y la “NORMA PARA REGULAR CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL DESCARGADAS AL ALCANTARILLADO SANITARIO”

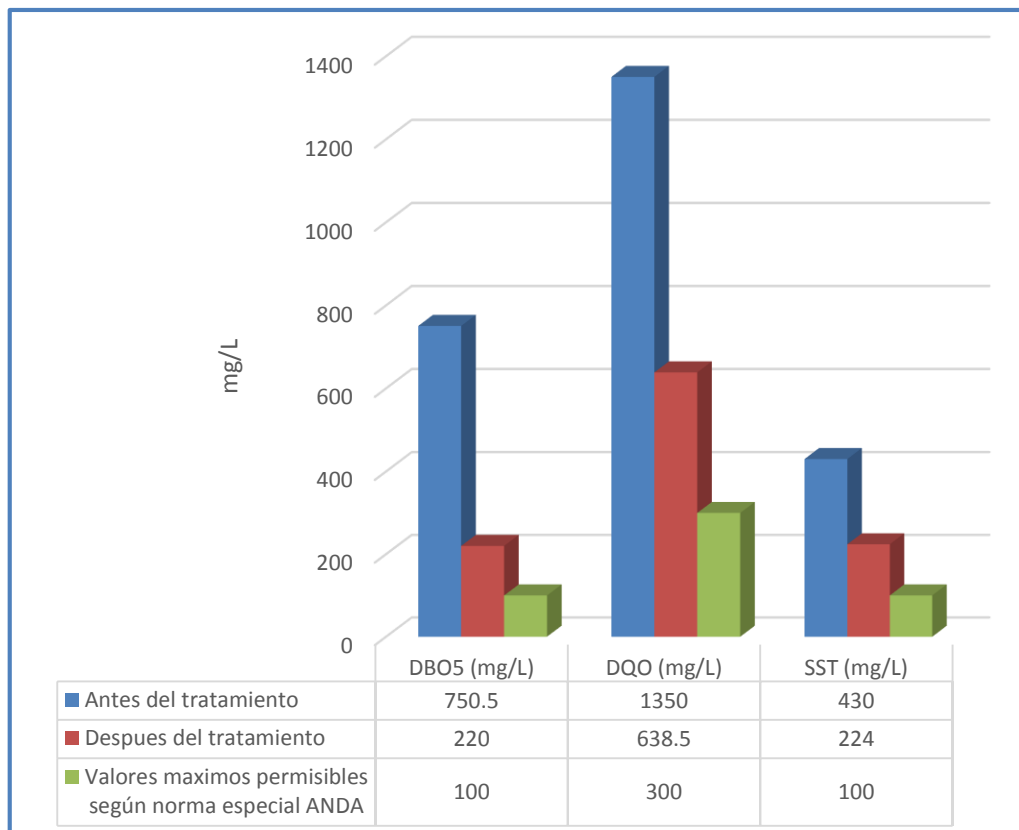


Figura 4.20 Comparación de resultados con la norma NSO13.49.01:09 utilizando floculante a partir del cladodio del nopal (*Opuntia ficus indica*)
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos se determina que el agua residual tratada con floculante a partir de cladodio de nopal no cumple con la normativa salvadoreña NSO 13.49.01:09 “Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor”, por lo que el agua tratada con este floculante no podría ser descargada a un cuerpo receptor

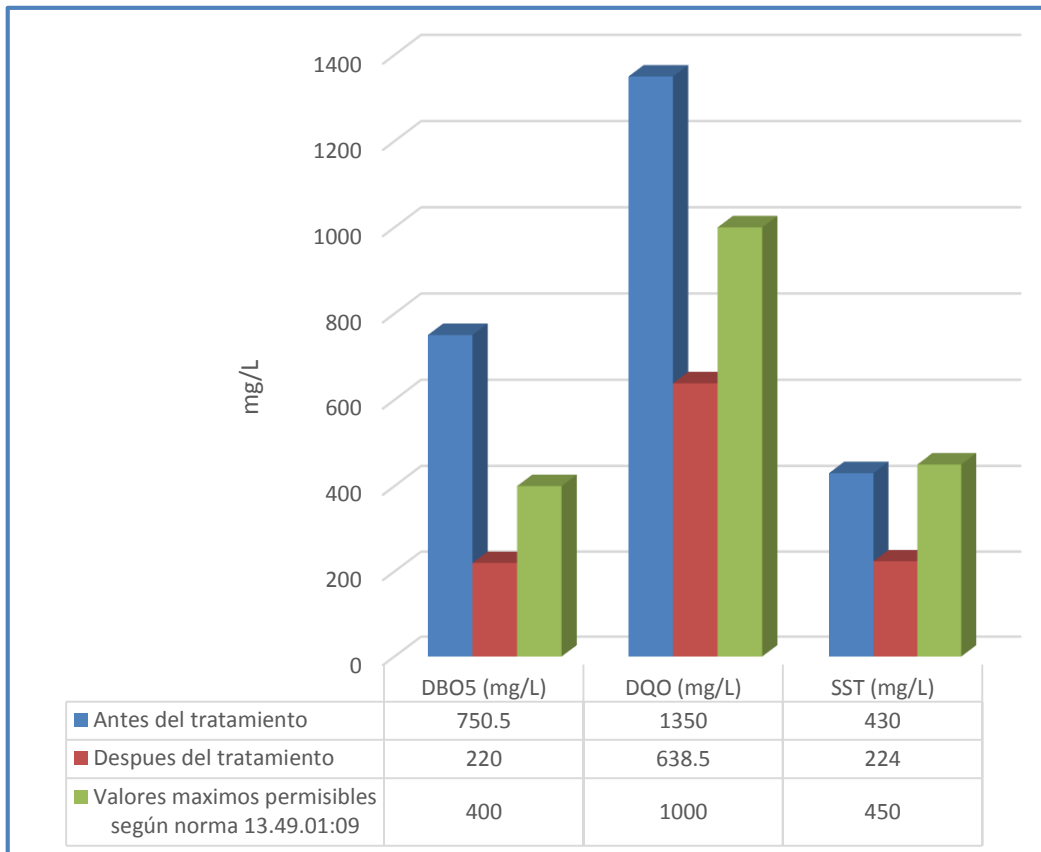


Figura 4.21 Comparación de resultados con la norma especial de ANDA utilizando floculante a partir del cladodio del nopal (*Opuntia ficus indica*)

De acuerdo a los resultados obtenidos se determina que el agua residual tratada con floculante a partir de cladodio de nopal está bajo los parámetros máximos permisibles por la “NORMA PARA REGULAR CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL DESCARGADAS AL ALCANTARILLADO SANITARIO” por lo que podría ser descargada en el alcantarillado de ANDA.

CAPITULO 5. ANÁLISIS DE BENEFICIO DE LOS FLOCULANTES NATURALES CON RESPECTO AL POLICLORURO DE ALUMINIO (PAC)

Se comparó el funcionamiento en la remoción de turbidez de los floculante naturales comparados con uno de los floculantes químicos más utilizados, como lo es el policloruro de aluminio (PAC). Además se evaluó el proceso y la infraestructura necesaria para la aplicación de los floculantes naturales a nivel del laboratorio; así como lo beneficios en su aplicación comparados con el PAC.

5.1 Prueba floculación utilizando policloruro de aluminio (PAC)

Esta prueba se realizó a nivel de laboratorio tomando con una probeta una muestra de 200 ml del agua residual, para luego ser vertida en un beaker de 250 ml. Para regular el pH del agua residual se instala un hot plate cerca del pH-metro y se agrega ácido sulfúrico mientras el agua residual esta en agitación con el fin de reducir el pH inicial de la muestra, logrando llevar la muestra a diferentes pH. Esta metodología es la realizada durante las 5 pruebas como se puede observar en la tabla 5.2.

Con el pH de operación regulado, el agua se mantiene en agitación constante con ayuda de un agitador magnético y un hot plate, para posteriormente agregar la dosis del floculante. Los tiempos de operación utilizados son; 1 minuto de agitación rápida, y 10 minutos de agitación lenta. Los parámetros de operación utilizados y los resultados obtenidos pueden observarse en las tablas 5.1,5.2 y 5.3.

Tabla 5.1 Condiciones iniciales de la prueba con el policloruro de aluminio (PAC).

pH de la Muestra Cruda	Turbidez Inicial (NTU)	Dosis
10	300	2 gotas

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2 Resultados utilizando el floculante PAC.

pH inicial de muestra	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción	pH final de la muestra
5	4.7	98.43%	4.4
6	15.7	94.76%	5.9
7	47.9	84.03%	6.8
8	155.3	48.23%	6.9
9	190.9	36.36%	7

Fuente: Elaboración propia.

La decisión del pH óptimo fue basada en el porcentaje de remoción de turbidez y el pH final del agua residual tratada. Utilizando un pH de operación de 5, se obtuvo un pH final de 4.4; el cual es demasiado bajo para hacer una descarga a las tuberías de aguas, por lo tanto se decidió tomar el de pH=6 como pH óptimo, fijarlo y así determinar la dosis óptima como se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Resultados utilizando el floculante PAC.

Dosis agregada de PAC(gotas)	Turbidez final (NTU)	Porcentaje de remoción	pH final
1	206.1	31.30%	6.3
2	13.5	95.50%	6
3	6.2	97.93%	5.3
4	7.8	97.40%	4.7
5	12.2	95.93%	4.1

Fuente: Elaboración propia.

Los mejores valores obtenidos para el floculante policloruro de aluminio (PAC) fueron los siguientes:

- ✓ pH óptimo de 6.
- ✓ Dosis óptima de 15 gotas de PAC por Litro de agua residual.
- ✓ Agitación rápida: 1 minuto
- ✓ Agitación lenta: 20 minutos

5.2 Análisis comparativo de los floculantes naturales a partir de la semilla de tamarindo y del cladodio del nopal versus el policloruro de aluminio (PAC).

Según la tabla 5.4 se puede observar los resultados finales de los parámetros evaluados, comparados con la norma salvadoreña NSO 13.49.01:09. En ella se incluyen los 3 floculantes con los que se han trabajado durante este tiempo, se determina que solo el agua tratada con el policloruro de aluminio está bajo los valores permisibles por la norma, por lo tanto es el mejor evaluado.

Al realizar la comparación con la norma para regular calidad de aguas residuales de tipo especial descargadas al alcantarillado sanitario de ANDA, el agua tratada con los 3 floculantes está bajo los valores permisibles por la norma, incluyendo los floculantes naturales, pero el PAC demostró tener mejores resultados.

Tabla 5.4 Comparación de los parámetros Evaluados con respecto a los floculantes Naturales versus el Policloruro de Aluminio (PAC).

PARÁMETROS A EVALUAR	Floculante Natural de la semilla de Tamarindo	Floculante Natural del Cladodio del Nopal	PAC	VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES SEGÚN NORMA	
				NSO 13.49.01:09	ANDA
DBO_{5,20} (mg/L)	150	210	2.7	100	400
DQO (mg/L)	478.5	638.5	139	300	1000
SST (mg/L)	144	224	0	100	450
PH	5.5	6.15	6	5.5-9	5.5-9

Fuente: Elaboración Propia

5.2.1 Análisis remoción de turbidez utilizando floculantes naturales y floculante químico (PAC)

Para esta comparación se realizó una tabulación de todos los datos obtenidos durante el experimento tanto como del floculante de tamarindo (*Tamarindus indica*), del floculante del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) y del floculante del policloruro de aluminio (PAC), con el objetivo de demostrar los resultados que se obtuvieron después de tratar el agua residual con los floculantes previamente mencionados.

En la tabla 5.5 se puede observar una comparación en la remoción de turbidez utilizando los floculantes a partir de la semilla de tamarindo y del cladodio de nopal. Y en la figura 5.6 se observa una comparación en la reducción de SST del agua residual después del tratamiento utilizando los 3 floculantes.

Tabla 5.5 Comparación de fracciones de remoción de turbidez de ambos floclantes naturales Fuente:

Número de Prueba	Floclante de semilla de Tamarindo(<i>Tamarindus indica</i>)				Floclante del Cladodio del Nopal(<i>Opuntia ficus indica</i>)			
	Parámetros de operación y Resultados				Parámetros de operación y Resultados			
	pH	Dosis (ml)	Tiempo de agitación	Fracción de Remoción	pH	Dosis (ml)	Tiempo de Agitación	Fracción de Remoción
1	5	1,2	10	0,3867	5	3	10	0.3317
2	5	1,6	10	0,5330	5	6	10	0.3587
3	5	2,0	10	0,5233	5	9	10	0.2667
4	5	1,2	20	0,4333	5	3	20	0.3617
5	5	1,6	20	0,5533	5	6	20	0.3740
6	5	2,0	20	0,5327	5	9	20	0.3333
7	5	1,2	30	0,4267	5	3	30	0.3600
8	5	1,6	30	0,5500	5	6	30	0.3717
9	5	2,0	30	0,5333	5	9	30	0.3350
10	5,5	1,2	10	0,2327	6	3	10	0.3667
11	5,5	1,6	10	0,4700	6	6	10	0.3780
12	5,5	2,0	10	0,4667	6	9	10	0.3457
13	5,5	1,2	20	0,2640	6	3	20	0.3760
14	5,5	1,6	20	0,5267	6	6	20	0.4033
15	5,5	2,0	20	0,5200	6	9	20	0.3493
16	5,5	1,2	30	0,2633	6	3	30	0.3790
17	5,5	1,6	30	0,5280	6	6	30	0.3990
18	5,5	2,0	30	0,5237	6	9	30	0.3463
19	6	1,2	10	0,1990	7	3	10	0.3000
20	6	1,6	10	0,3000	7	6	10	0.2743
21	6	2,0	10	0,2817	7	9	10	0.2733
22	6	1,2	20	0,2483	7	3	20	0.3110
23	6	1,6	20	0,3637	7	6	20	0.3067
24	6	2,0	20	0,3327	7	9	20	0.3317
25	6	1,2	30	0,2617	7	3	30	0.3107
26	6	1,6	30	0,4007	7	6	30	0.2837
27	6	2,0	30	0,3500	7	9	30	0.3280

Fuente: Elaboración propia

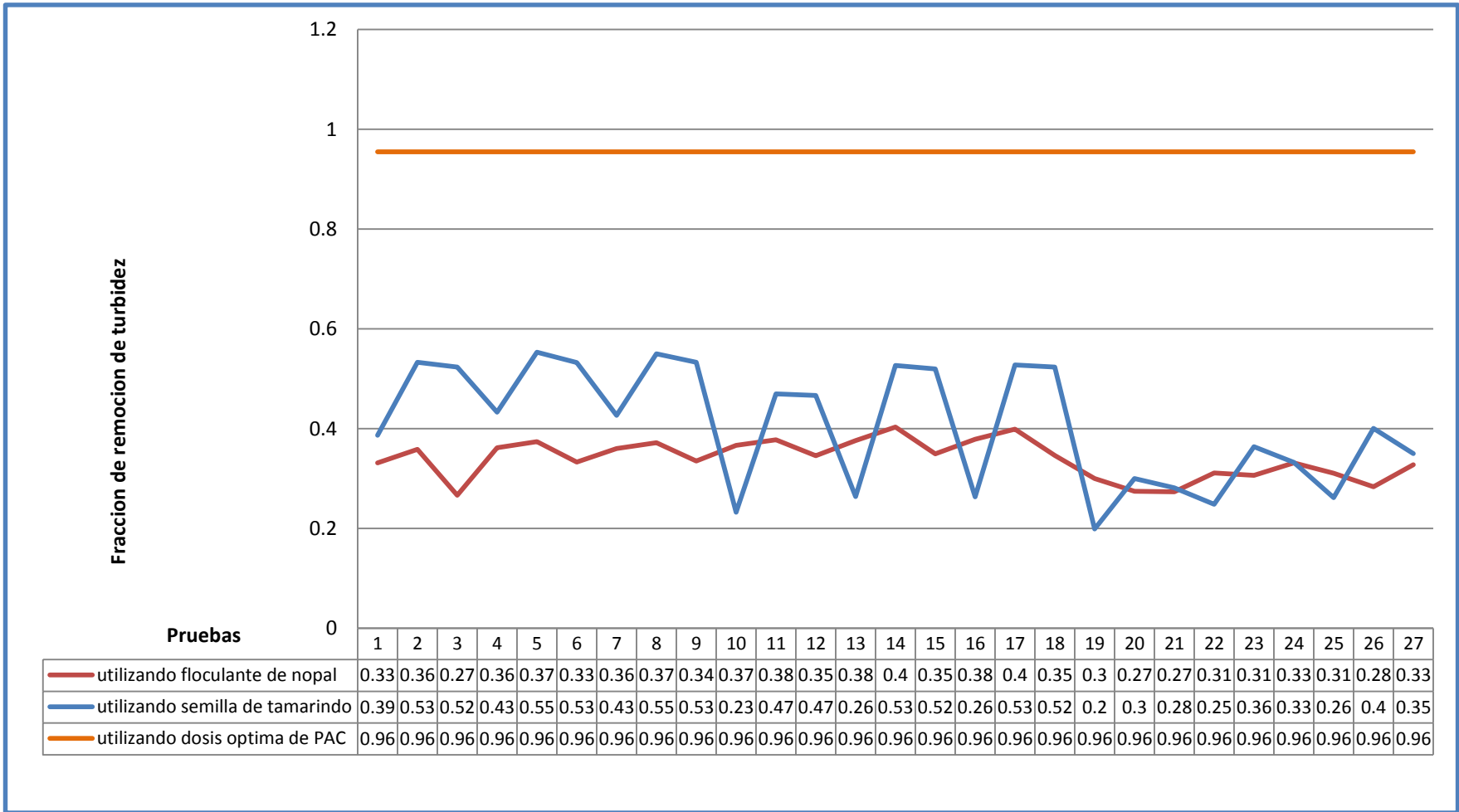


Figura 5.1 Comparación de la fracción de remoción utilizando floculantes naturales vs remoción óptima utilizando PAC

Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.1 se evidencia claramente la diferencia que existe entre la remoción de turbidez que tienen los floculantes naturales a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) y cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*), y el floculante químico (PAC), el cual remueve el 97.93 % de turbidez.

5.3 Evaluación del proceso y la infraestructura necesaria para la aplicación de los floculantes naturales a nivel del laboratorio.

5.3.1 Detalles de operación de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)

La semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) será la materia prima del proceso de producción, esta será adquirida a través de empresas que se dedican a la comercialización de mermeladas de tamarindo, las cuales usan la pulpa para la elaboración de sus productos y desechan la semilla.

Luego las semillas de tamarindo serán sometidas a un proceso de hidratación durante un tiempo de 3 días a temperatura ambiente, en piletas cuyas especificaciones se muestran en la tabla 5.6

Después de la hidratación serán trasladadas a una maquina despulpadora, se recomienda que se utilice una que fue diseñada para despulpado de café, con las especificaciones mostradas en la tabla 5.6. La semilla de tamarindo luego de su hidratación, necesita una fuerza de cizalla relativamente pequeña para la remoción de la capa marrón, y obtener los cotiledones de color blanco.

Los cotiledones obtenidos serán llevados a un horno, en el cual permanecerán por un tiempo 12 horas a una temperatura 65 °C con el fin de deshidratarlos lo más posible.

Posteriormente serán sometidos al proceso de molienda, con el fin de obtener partículas menores a 0.50 milímetros se recomienda el equipo mostrado en la tabla 5.6. Con el fin de garantizar el tamaño de partícula, posterior al proceso de molienda, se pasara por un tamiz con las especificaciones mostradas en la tabla 5.6. Las partículas retenidas en el tamiz serán recirculadas al proceso de molienda, hasta obtener el tamaño de partícula deseado, el cual será el floculante en polvo.

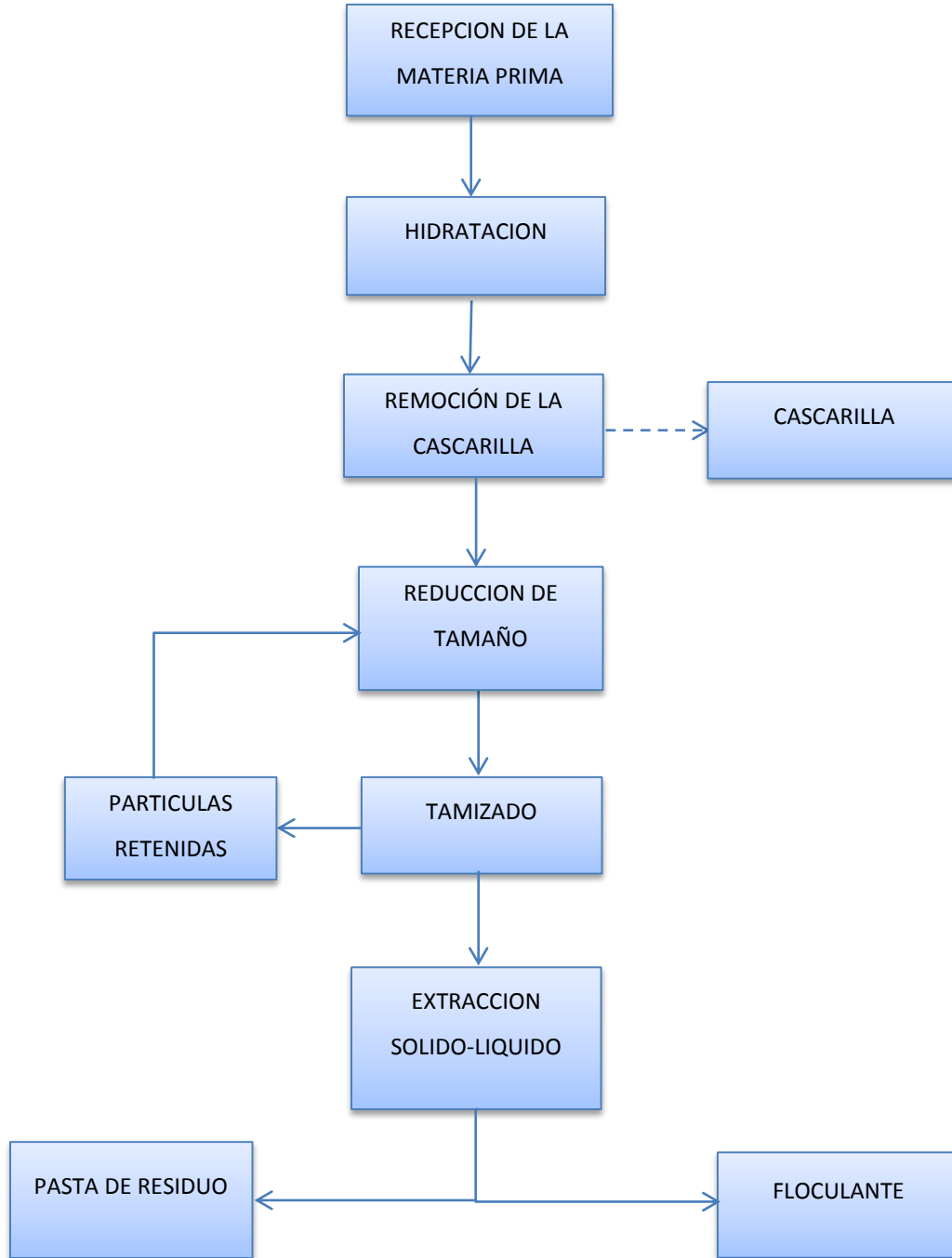
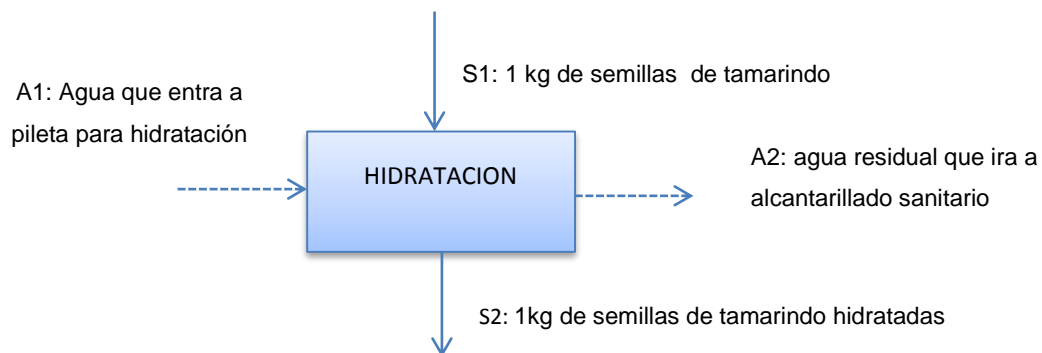


Figura 5.2 Diagrama de bloques del proceso de producción de floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*).

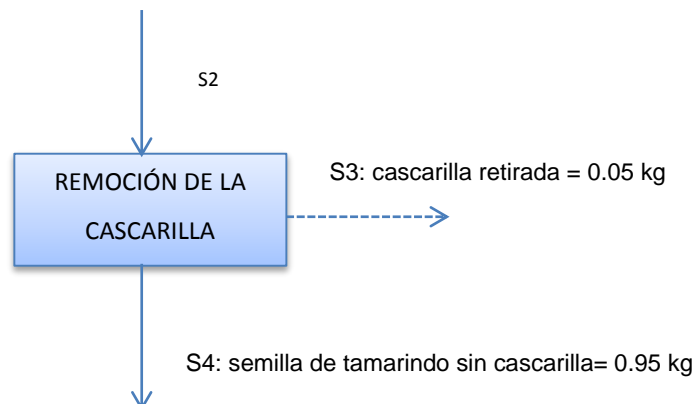
5.3.2 Balance de masa de la extracción de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)

La producción descrita en la figura 5.2 se puede caracterizar de la siguiente manera: las semillas son adquiridas y llevadas a la pileta de hidratación donde permanecerán por 3 días antes de que la cascarilla sea retirada de las mismas, se trabajara con una base de 1kg de semillas. Para la hidratación serán necesarios dos litros de agua por cada kg de tamarindo, la cual podrá ser utilizada por un máximo de 3 ocasiones antes de ser desechada.

Base 1 kg de semilla de tamarindo:

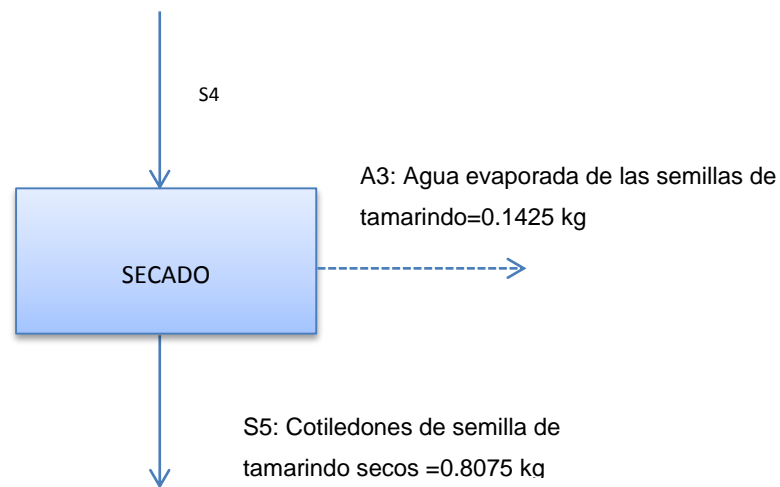


Debido a que se trata de una pequeña cantidad, agua retenida por las semillas durante la hidratación será despreciable (se asumirá que los dos litros de agua que ingresan: A1, son los mismos dos litros de agua que salen en: A2), durante el balance del rendimiento de floculante no tendrá influencia ya que dicha agua será evaporada durante el proceso de secado.



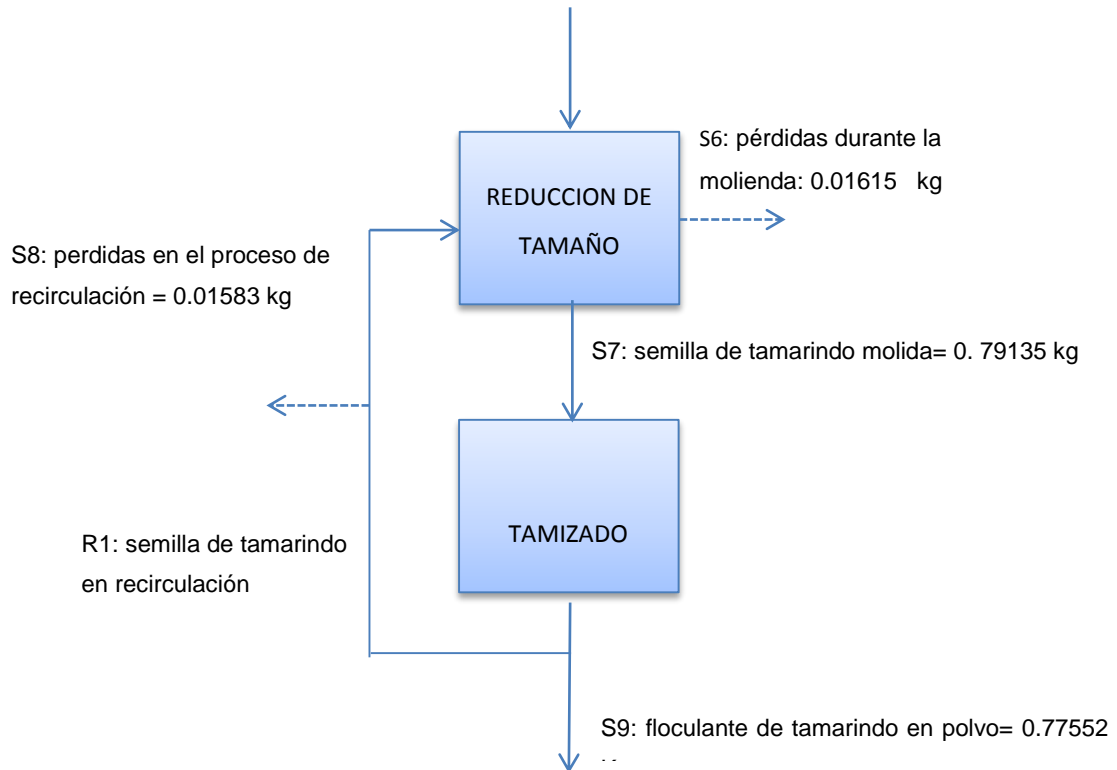
Durante la etapa de remoción de la cascarilla, la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) ingresara de forma hidratada con el fin de facilitar la remoción de la cascarilla.

La cascarilla no posee ningún valor nutricional, como se mencionó en el capítulo 1, esta al ser ingerida podría generar problemas a la salud, por lo cual se podría utilizar como abono en tierras de sembradío. No hay informes previos sobre el porcentaje de cascarilla en una semilla de tamarindo, por ello de acuerdo a los resultados empíricos, se le asignara un valor del 5% respecto al peso total de la semilla.



El contenido de humedad del cotiledón de semilla de tamarindo está en un rango del 11.4% a 22.7 %, por lo cual para fines de cálculo, se le asignara un valor del 15 % de contenido de humedad. Por ello de los 0.95 kg de semilla de tamarindo que procedían de S4, 0.1425 salen del proceso como agua en forma de vapor, y 0.8075 siguen en el proceso: S5.

La reducción de tamaño se hará en un molino que no genere perdidas en la molienda, sin embargo siempre se tomara en cuenta pequeñas pérdidas que quedan en el equipo, por lo cual se le da un valor estimado del 2 % de pérdidas.



En la recirculación se estima que sea un 5 % de S7, sin embargo, como volverá a ser recirculada no se tomará en cuenta para el balance. Se asignará un valor para las pequeñas pérdidas durante el proceso de tamizado y recirculación, el cual es de 2%.

El rendimiento es calculado dividiendo la cantidad de floculante obtenido (S9), entre la cantidad de semilla de tamarindo que ingreso como materia prima (S1).

$$\text{Rendimiento} = \frac{0.77552 \text{ Kg de floculante en polvo}}{\text{kg de semilla de tamarindo}}$$

Tabla 5.6 Resumen de corrientes del balance de masa para el floculante a partir de semilla de tamarindo


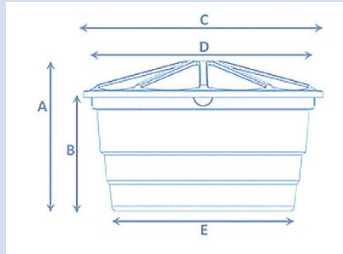

ETAPA	CORRIENTE	SIGNIFICADO	VALOR
Hidratación	S1	Ingreso de semillas de tamarindo como materia prima	1 Kg
	S2	Semilla de tamarindo hidratada	1 Kg
	A1	Agua que entra a pileta para hidratación	2 litros
	A2	Agua que sale de la pileta	2 litros
Remoción de cascarilla	S3	Cascarilla de la semilla de tamarindo	0.0500 Kg
	S4	Semilla de tamarindo sin cascarilla	0.9500 Kg
Secado	S5	Cotiledones de semilla de tamarindo secos	0.8075 Kg
	A3	Agua evaporada de las semillas de tamarindo	0.1425 Kg
Reducción de tamaño tamizado	S6	Pérdidas durante la molienda	0.0162 Kg
	S7	Semilla de tamarindo molida	0.7913 Kg
	S8	Pérdidas en el proceso de recirculación	0.01583 kg
	S9	Floculante a partir de semilla de tamarindo en polvo	0.77552 Kg
	R1	Polvo de semilla de tamarindo en recirculación	0.0396 Kg

Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Equipos recomendados para la producción del floculante a partir del cladodio de nopal (*Opuntia ficus-indica*)

Dentro de los detalles de operación mencionados anteriormente se pueden utilizar equipos para realizar el proceso a nivel de laboratorio los cuales se explican a continuación:

Tabla 5.7 Descripción de los equipos recomendados para la extracción del floculante de tamarindo (*Tamarindus indica*)

No	NOMBRE EQUIPO	ESPECIFICACIONES	ILUSTRACION DEL EQUIPO
1	Estanque fortlev	<p>Mucho más prácticas y duraderas, las Cajas de agua de polietileno FORTLEV poseen superficies interiores lisas que facilitan la limpieza.</p> <p>Capacidad: 250 L Dimensiones: A: 0.66 m B: 0.50 m C: 1.04 m D: 1.03 m E: 0.78 m</p>	 
1	Despulpadora Jotagallo 2 1/2	<p>Capacidad de despulpado: 300 Kg/h Numero de Chorros: 2 Camisa Utilizada: (17 * 72) cm Potencia requerida: 0.5 HP Revoluciones de motor: 1800</p>	

continúa

continuación

Tabla 5.7 Descripción de los equipos Recomendados para la Extracción del Floculante de Tamarindo (*Tamarindus indica*)

No	NOMBRE EQUIPO	ESPECIFICACIONES	ILUSTRACION DEL EQUIPO
1	Despulpadora Jotagallo 2 1/2	<p>Capacidad de despulpado: 300 Kg Hora Numero de Chorros: 2 Camisa Utilizada: (17 * 72) cm Potencia requerida: 0.5 HP Revoluciones de motor: 1800</p>	
1	Estufa	<p>Función: secado, de calor Configuración: cámara Fuente de calor: eléctrico Atmósfera: convección forzada Otras características: digital, de laboratorio Temperatura máxima: Mín.: 40 °C (104 °F), Máx.: 250 °C (482 °F).</p> <p>La serie MOV de SANYO se elaboró debido al objetivo continuo de ofrecer un control más preciso y de mayor conformidad. Su sistema de control de la temperatura mediante microprocesador PID garantiza un ambiente de temperatura de alta precisión. Dispone además de un calentador con cubierta para asegurar la seguridad. El dispositivo también incluye componentes de seguridad y alarma</p>	
1	MOLINO DE CUCHILLAS GRINDOMIX GM200	<p>Aplicación: reducción de tamaño, homogeneización y mezcla. Campos de aplicación: agricultura, alimentos, biología, farmacia. Tipo de material: blando, semiduro, elástico, contiene agua/grasa/aceite, seco, fibroso.</p>	

continúa

continuación

Tabla 5.7 Descripción de los equipos Recomendados para la Extracción del Floculante de Tamarindo (*Tamarindus indica*)

No	NOMBRE EQUIPO	ESPECIFICACIONES	ILUSTRACION DEL EQUIPO
1	MOLINO DE CUCHILLAS GRINDOMIX GM200	<p>Principio de molienda: Corte. Granulometría inicial: 40 mm. Granulometría final: < 300 µm. Carga / cant. Material alimentado: con tapa estándar 700 ml. Duración de la molienda: digital, 1 min - 3 min.</p> <p>En el centro del recipiente de molienda se encuentran 2 cuchillas afiladas y robustas que realizan un movimiento circular. Dependiendo de la dirección de giro, la muestra es triturada por la arista roma (trituración preliminar) o por la arista afilada (molienda fina). Para proteger las cuchillas contra daños por choque con materiales muy duros, éstas han sido biseladas. Las cuchillas son accionadas indirectamente por un potente motor industrial de 900 watts en modo de operación continuo.</p>	

5.3.4 Detalles de operación del nopal (*Opuntia ficus indica*).

El primer proceso que pasa el cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) es la eliminación de espinas, cutícula y bordes, por medio de una maquina desespinadora y peladora, con el fin de obtener el mucílago del nopal.

Luego de obtener el mucilago que es la parte blanda que se encuentra en el centro del cladodio, esta pasa a una cortadora de cuchillas de nopal garantizando una reducción de tamaño de 1 cm de ancho por tira, las cuales tenían un tamaño inicial de 30 cm de largo aproximadamente.

El mucílago cortado pasa inmediatamente a una estufa donde se calienta a una temperatura de 120 °C durante un tiempo 6 horas inicialmente, luego la temperatura se disminuye a 60 °C durante 6 horas, de esta forma se agiliza el proceso evitando realizar un secado natural que tiene una duración de 15 días expuestas durante las 8 horas de sol, con el fin de obtener el mucilago del nopal deshidratado.

En la siguiente etapa el mucilago deshidratado se transporta a un molino donde se tritura hasta obtener un polvo de color verdoso. Luego la materia prima que ya se encuentra en polvo, se tamiza, garantizando que cumpla con los requisitos del tamaño de partícula ≤ 0.5 mm de diámetro.

En la etapa de despigmentación se retira el color verde musgo que contiene el mucilago del nopal, con ayuda de un equipo soxhlet donde se utiliza como solvente etanol, se hace un sinfín de extracciones de manera automática con el mismo solvente que se evapora y condensa llegando siempre de puro al material, de esta forma el material obtenido queda libre de los pigmentos y finalmente se lleva a la estufa durante 30 minutos para retirar cualquier sustancia del solvente en el material.

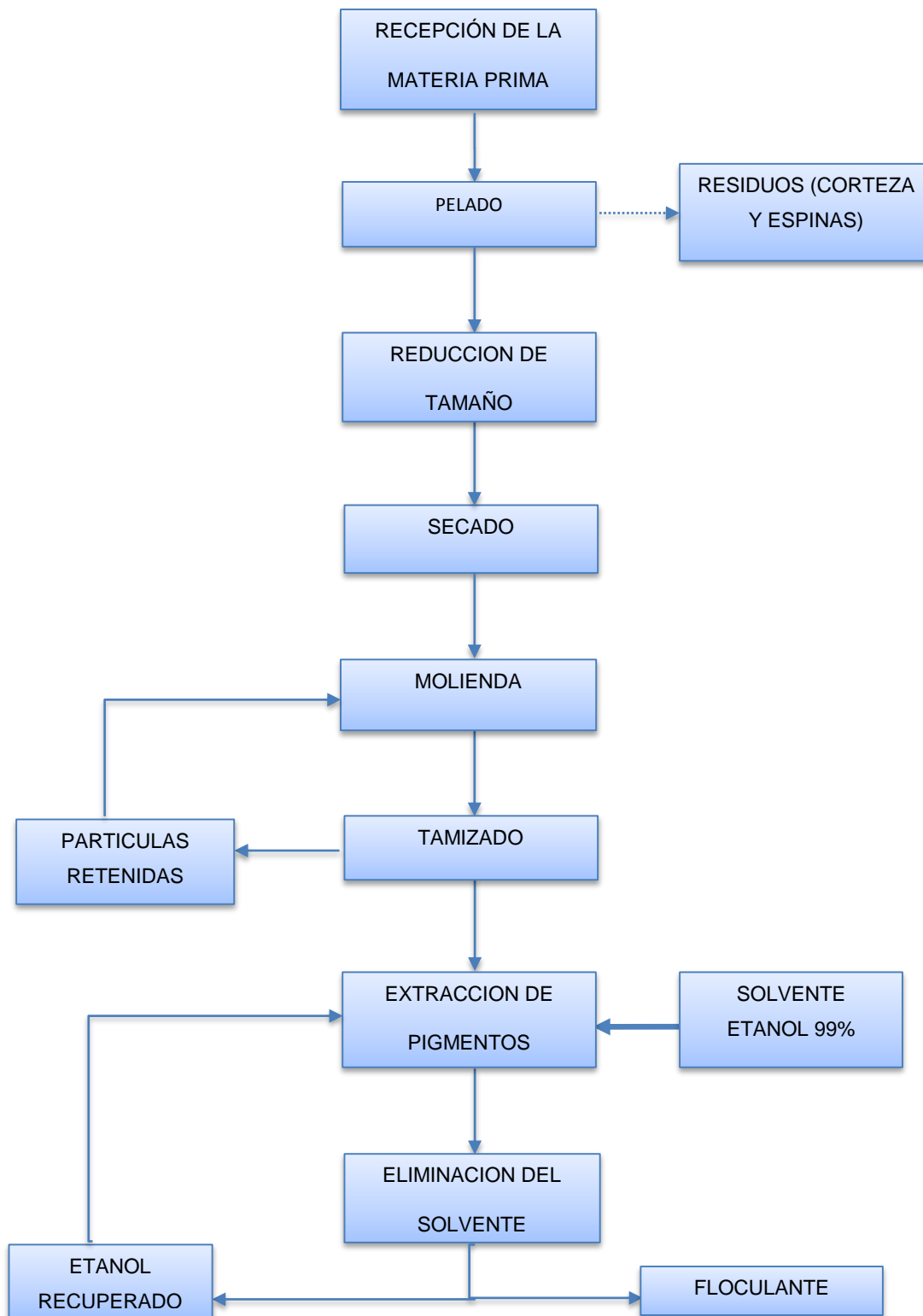
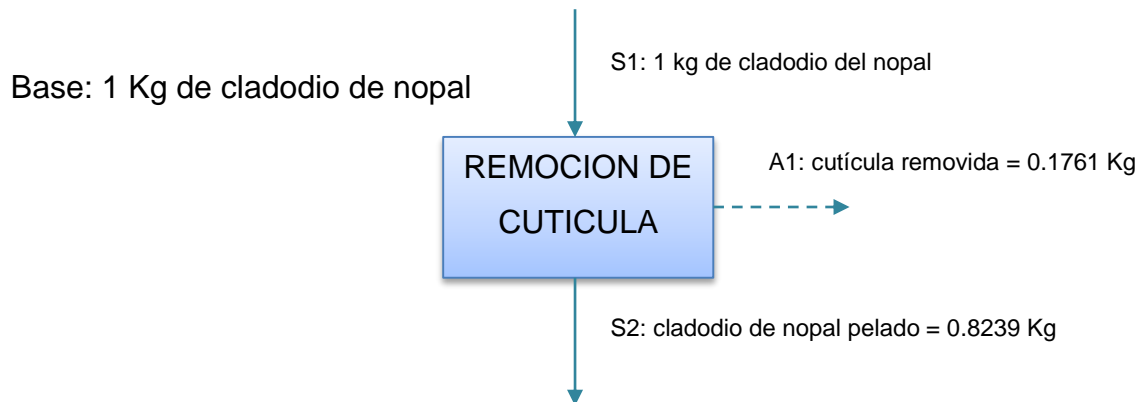


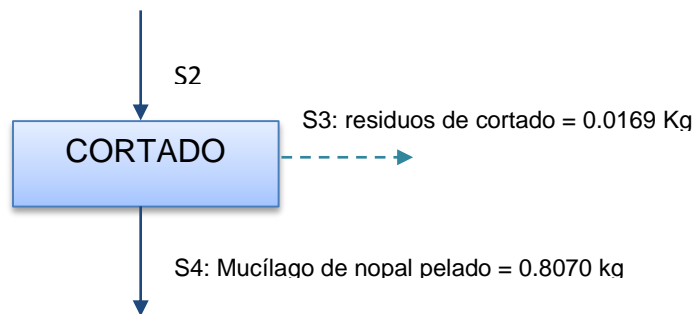
Figura 5. 3 Diagrama de bloques del proceso de producción del floculante del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*)

5.3.5 Balance de masa de la extracción del mucílago del nopal (*Opuntia ficus indica*)

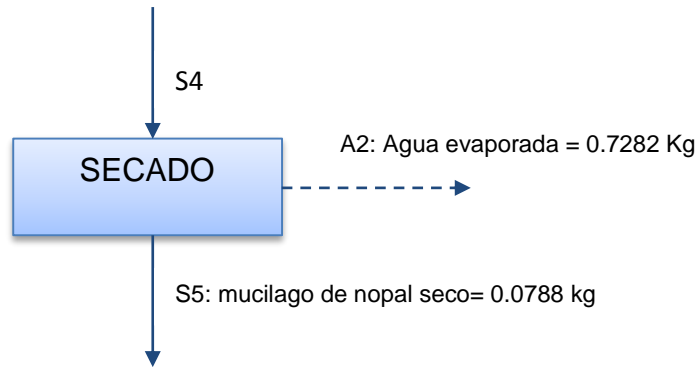
La producción descrita en la figura 5.3 se puede caracterizar de la siguiente manera: los cladodios del nopal son adquiridos y llevadas al laboratorio para retirarle la cutícula (espinas, corteza) del tal manera que solo obtengamos el mucílago del nopal.



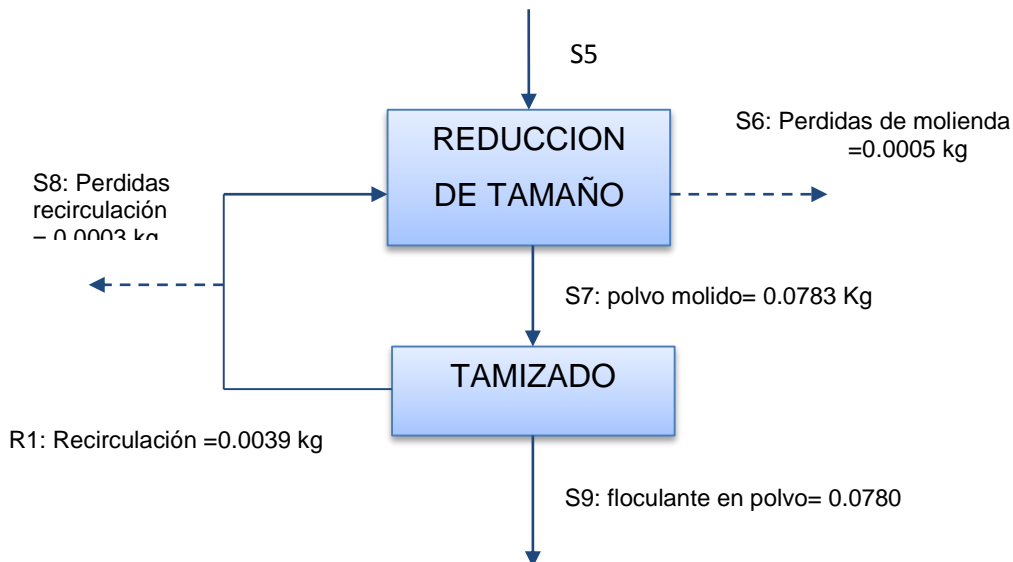
En esta etapa se remueve el 17.61% de cutícula por lo tanto se obtiene de mucílago 0.8239 kg para luego este ser cortado en porciones de 5 cm.



Se le asigna un valor de pérdida estimado del 2.06% en la etapa de cortado. El anexo 5 indica el porcentaje de humedad que el mucílago del nopal, el cual es de 90.23%.

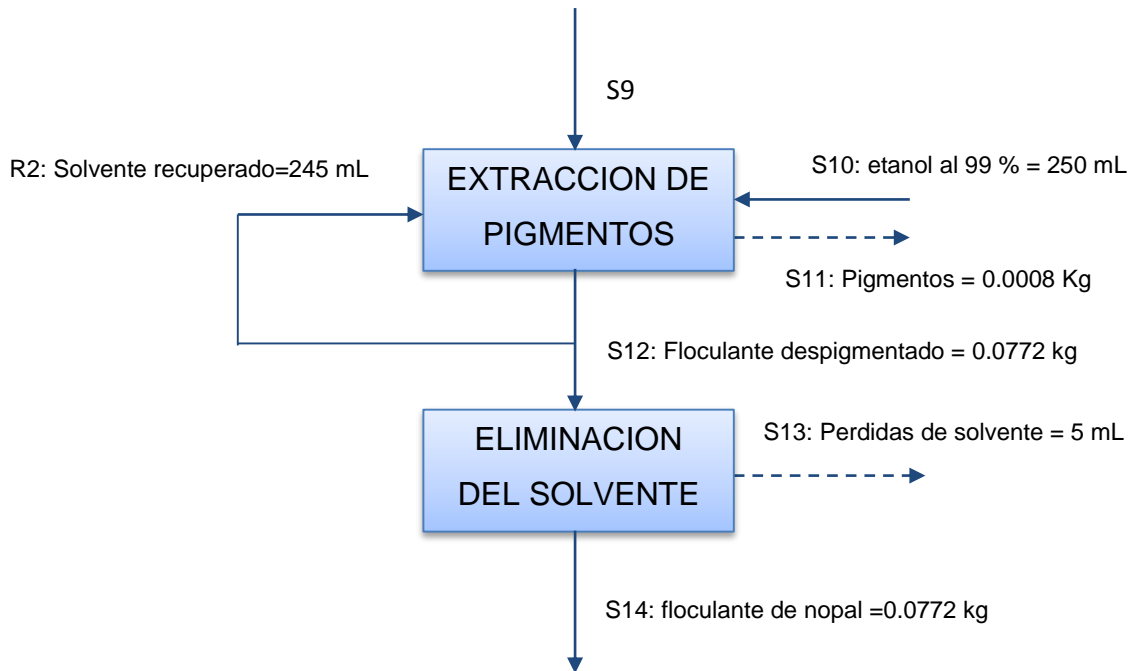


De los 0.8070 kg de mucilago de nopal que procedían de S4, solamente 0.0788 kg continúan en el proceso, el resto sale del proceso en forma de vapor de agua.



La trituración o reducción de tamaño se realizará en un molino que no genere pérdidas, pero siempre se considerara un porcentaje ya que se tomara en cuenta pequeñas pérdidas que quedan en el equipo el cual es un valor estimado del 0.63%.

En la recirculación se estima un 5 % de S7, sin embargo, no será tomado en el balance, ya que dicha cantidad estará en recirculación. Se asignara un valor para las pequeñas pérdidas durante el proceso de tamizado y recirculación, el cual es de 0.38%.



Para la eliminación de pigmentos se utiliza el equipo Soxhlet, el cual retira los pigmentos de color verde musgo que contiene el mucilago del nopal en polvo, el tiempo necesario para realizar esa etapa es 6 horas donde se utiliza como solvente etanol al 99%. El pigmento extraído es aproximadamente el 1 % de S9.

El etanol se puede recuperar casi en su totalidad por medio de una destilación y reutilizar en el proceso, sin embargo durante la etapa de eliminación del solvente se aproxima un porcentaje de pérdidas del 2% .

El rendimiento es calculado dividiendo la cantidad de floculante obtenido (S14), entre la cantidad de nopal que ingreso al proceso (S1).

$$\text{Rendimiento} = \frac{0.0772 \text{ Kg de floculante en polvo}}{\text{kg de cladodio de Nopal}}$$

Tabla 5.8 Resumen de corrientes en el balance de masa para el floculante a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*)

ETAPA	CORRIENTE	SIGNIFICADO	VALOR
Remoción de cutícula	S1	Materia prima, cladodios de nopal	1 Kg
	S2	Cladodios de nopal pelados	0.8239 Kg
	A1	Cutículas de cladodio de nopal	0.1761 Kg
Cortado	S3	Residuos de cortado	0.0169 Kg
	S4	Nopal pelado y cortado	0.8070 Kg
Secado	S5	Nopal deshidratado	0.0788 Kg
	A2	Agua en forma de vapor	0.7282 Kg
Reducción de tamaño y tamizado	S6	Perdidas por molienda	0.0005 Kg
	S7	Polvo de nopal molido	0.0783 Kg
	S8	Perdidas recirculación	0.0003 Kg
	S9	Floculante en polvo	0.0780 Kg
	R1	Recirculación de polvo de floculante	0.0039 kg
Extracción de solvente	S10	Etanol al 99 %	250 mL
	S11	Pigmentos extraídos	0.0008 Kg
	S12	Floculante despigmentado	0.0772 Kg
	R2	Recirculación de etanol	245 mL
Eliminación de solvente	S13	Perdidas de solvente	5 mL
	S14	Floculante en polvo a partir de nopal	0.0772 Kg

Fuente: Elaboración propia

5.3.6 Equipos recomendados para la producción del floculante a partir del cladodio de nopal (*Opuntia ficus-indica*)

Dentro de los detalles de operación mencionados anteriormente se pueden utilizar equipos para realizar el proceso a nivel de laboratorio, como los siguientes:



Tabla 5.9 Descripción de los Equipos Recomendados para la Extracción del Floculante de Cladodio del Nopal (*Opuntia ficus indica*).

N o	NOMBRE EQUIPO	ESPECIFICACIONES	ILUSTRACION DEL EQUIPO
1	Máquina Desespinator a "NOPALLI"	<ul style="list-style-type: none"> • Acero Inoxidable tipo 304 • Estructura Tubular • Sistema de rodillos para la tracción • Ajuste de profundidad del desespinado • Ajuste de Tensión en las porta cuchillas • Ajuste del ángulo de incidencia de corte • No lastima el Cladodio • No desbasta la raqueta • Compacta en Dimensiones • Bases de nivelación • Energía Eléctrica: Motor 1 HP: 110 V. 0.75 KWh • Capacidad de Producción: 200 kg x hora 	
1	CORTADOR A DE NOPAL	<ul style="list-style-type: none"> • Banda ahulada para alimentación. Rodillo de hule sanitario para avance del producto. • Rodillo con cuchillas circulares para corte longitudinal. • Hélice con cuchillas rectas para corte transversal. • Motor de 1.0 HP 8. Tolva de descarga. • Producción: hasta 200 kg/h. • Corte ajustable para diferentes largos de tira: 8.0, 4.0, 2.0 y 1.0 cm. • Ancho de tira: 1.0 cm. <p>Consta de un mueble construido en acero inoxidable tipo 304, bases con ruedas, banda de alimentación, rodillo de hule sanitario, rodillo con cuchillas, hélice de cuchillas, tolva de descarga y motor. Su diseño permite una fácil y rápida limpieza del equipo.</p>	

continúa

continuación

Tabla 5.9 Descripción de los Equipos Recomendados para la Extracción del Floculante de Cladodio del Nopal (*Opuntia ficus indica*).

No	NOMBRE EQUIPO	ESPECIFICACIONES	ILUSTRACION DEL EQUIPO
1	ESTUFA	<ul style="list-style-type: none"> • Función: secado, de calor • Configuración: cámara • Fuente de calor: eléctrico • Atmósfera: convección forzada • Otras características: digital, de laboratorio • Temperatura máxima: Mín.: 40 °C (104 °F), Máx.: 250 °C (482 °F). <p>La serie MOV de SANYO se elaboró debido al objetivo continuo de ofrecer un control más preciso y de mayor conformidad. Su sistema de control de la temperatura mediante microprocesador PID garantiza un ambiente de temperatura de alta precisión. Dispone además de un calentador con cubierta para asegurar la seguridad. El dispositivo también incluye componentes de seguridad y alarma</p>	
1	MOLINO DE CUCHILLAS GRINDOMIX GM200	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación: reducción de tamaño, homogeneización y mezcla. • Campos de aplicación: agricultura, alimentos, biología, farmacia. • Tipo de material: blando, semiduro, elástico, contiene agua/grasa/aceite, seco, fibroso. • Principio de molienda: Corte. • Granulometría inicial: 40 mm. • Granulometría final: < 300 µm. • Carga / cant. Material alimentado: con tapa estándar 700 ml. • Duración de la molienda: digital, 1 min - 3 min. • Operación por intervalos: si. <p>En el centro del recipiente de molienda se encuentran 2 cuchillas afiladas y robustas que realizan un movimiento circular. o por la arista afilada (molienda fina). Las cuchillas son accionadas indirectamente por un potente motor industrial de 900 watts en modo de operación continuo.</p>	

continúa

Tabla 5.9 Descripción de los Equipos Recomendados para la Extracción del Floculante de Cladodio del Nopal (*Opuntia ficus indica*).

No	NOMBRE EQUIPO	ESPECIFICACIONES	ILUSTRACION DEL EQUIPO
1	TAMIZADOR AS Ro-Tap®	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere mínimo mantenimiento. • Uso intensivo. • Cuenta con 99 minutos de reloj digital / reloj. • Cada prueba de unidad se ejecuta y se serializa antes del envío. • Presupuesto Oscilaciones por minuto: 278. • Oscilaciones Desplazamiento: 1 "x .75" Grifos por Minuto: 150. • Peso del martillo: 5 libras, 6 onzas. <p>Las tamizadoras de laboratorio Ro-Tap® desarrolladas por W.S. Tyler™ son requeridas en numerosos estándares ASTM y son bien reconocidas en la industria norte americana. La compañía WS Tyler™ es igualmente la líder norte americana en tamices analíticos de todas las dimensiones. Estos tamices son fabricados según lo estándares ASTM E-11 e ISO 3310-1.</p>	
1	SOXHLET MÉTODO DE EXTRACCIÓN FA-46	<ul style="list-style-type: none"> • Gama de medición: 0-100% • Capacidad por lote: 6pcs./batch. • Peso de la muestra: 0.5-15g • Volumen de la copa del disolvente: 80ml. • Gama de temperatura de la sala + 5 ° C - 280 ° C. • Precisión de la temperatura ± 1 ° C • Recuperación del solvente ≥80% • Reproducibilidad ± 1% • Alimentación 200V 50Hz • Alimentación 1000W <p>El Fat Analyzer basado en el principio de extracción de Soxhlet: extracción, extracción, lixiviación, calentamiento, condensación y recuperación de solventes. Puede separar rápidamente una sustancia e mezclas sólidas o semisólidas, determinar los compuestos orgánicos solubles contenidos en alimentos, medicamento, suelo, lodos, polímeros, productos de fibra, Productos petroquímicos, detergentes.</p>	

5.4 Beneficio de los floculantes naturales versus los floculantes químicos

5.4.1 Beneficio ambiental

El uso de floculantes naturales a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) y cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*), en sustitución del Policloruro de Aluminio (PAC) tiene grandes beneficios a nivel ambiental, ya que se eliminan las cantidades de aluminio ingresadas al medio ambiente debido al residual que queda posterior al proceso de coagulación-floculación; este aluminio en el medio ambiente tendría serias repercusiones en la flora, fauna y directamente sobre la salud del ser humano, ya que muchos investigadores aceptan que el aluminio desempeña un papel importante en las enfermedades degenerativas como el Alzheimer .

En El Salvador, la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) y el nopal (*Opuntia ficus indica*), no tienen ningún valor a nivel comercial, por lo que actualmente simplemente se trata como un desecho común; por lo que al utilizarlos como floculante, se estaría haciendo un aprovechamiento de los recursos naturales, y transformando un desecho común a un producto funcional, el cual sería amigable con el medio ambiente.

5.4.2 Beneficio económico

Actualmente el floculante utilizado comúnmente (PAC) es de origen químico, el cual acarrea desventajas tanto ambientales como económicas ya que los lodos generados en la etapa de coagulación-floculación están constituidos por sustancias inorgánicas que alteran los procesos naturales presentes en las fuentes de aguas a las cuales son vertidos.

Desde el punto de vista económico el floculante químico (PAC), y los floculantes químicos en general son más costoso; pues se trata de un compuesto químico que contienen electrolitos los cuales van a desestabilizar las cargas eléctrica de las partículas que traiga el agua a ser tratada; en su proceso de fabricación se consumen energía y materia, lo que se traduce en costos de producción, además se generan residuos que causan contaminación al medio ambiente. Por otra parte los coagulantes naturales a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) y cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*) son de bajo costo, si bien menos accesibles, permiten la implementación de métodos naturales para el tratamiento aguas residuales (en este caso las provenientes de lavanderías industriales), pues son componentes naturales que van a actuar en el agua sin alterar sus propiedades químicas originales.

Sin embargo estos coagulantes no son usados actualmente a escalas mayores en el tratamiento de aguas residuales, sino que son aplicados como investigaciones de universidades o por comunidades pequeñas (en el caso de mucilago de nopal). Por ello es necesario conocer más a fondo todas las características de estos floculantes naturales para su posterior uso a nivel industrial. Sin embargo, estos floculantes no poseen ninguna repercusión en la salud del ser humano, lo que trae una mayor ventaja frente a los coagulantes inorgánicos.

CONCLUSIONES

1. El Salvador presenta condiciones climáticas y geográficas favorables para que el árbol de tamarindo y la planta de nopal puedan ser cultivadas, y ser fuente de materia prima para la extracción de floculantes naturales para el tratamiento de aguas residuales.
2. En el diseño de experimentos del tipo 3³ para el floculante a partir de semilla de tamarindo se comprobó que tanto la interacción de la dosis, el pH y el tiempo de agitación tienen un efecto significativo en la remoción de turbidez de aguas residuales provenientes de una lavandería industrial.
3. En las pruebas realizadas utilizando floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*), se logró un 55.33 % de remoción de turbidez, bajo los parámetros óptimos de pH de operación de 5, dosis de floculante agregado de 8 ml/Litro de agua residual y un tiempo de agitación de 20 minutos.
4. El agua residual tratada con floculante a partir de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) presentó los parámetros fisicoquímicos: DBO 150 mg/L, DQO 478.5 mg/L, y SST 144 mg/L, por lo que el agua tratada puede ser descargada en el alcantarillado de ANDA, pero no a un cuerpo receptor.
5. En el diseño de experimentos del tipo 3³ para el floculante a partir de cladodio de nopal se comprobó que tanto la interacción de la dosis, el pH y el tiempo de agitación tienen un efecto significativo en la remoción de turbidez de aguas residuales provenientes de una lavandería industrial.
6. En las pruebas realizadas utilizando floculante a partir del cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*) se logró un 40.30 % de remoción de turbidez, bajo los

parámetros óptimos de pH de operación de 6, dosis de floculante agregado de 30 ml/Litro de agua residual y un tiempo de agitación de 20 minutos.

7. El agua residual tratada con floculante a partir de cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*) presento los parámetros fisicoquímicos: DBO 220 mg/L, DQO 638.5 mg/L, y SST 224 mg/L., por lo que el agua tratada puede ser descargada en el alcantarillado de ANDA, pero no a un cuerpo receptor.
8. El floculante de origen químico (PAC) obtuvo una remoción de turbidez del 97.93 %, un valor muy por encima de los valores obtenidos en los floculantes naturales en estudio.

RECOMENDACIONES

1. Se debe integrar a empresarios tanto del sector público, como del privado a nivel nacional para generar un aprovechamiento industrial de los floculantes naturales a partir de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) y de cladodio de nopal (*Opuntia ficus indica*), difundir información sobre todos los beneficios ambientales de su uso y todos los aspectos agronómicos necesarios para un buen desarrollo del recurso.
2. Realizar un estudio más profundo acerca de la evaluación del impacto que pueda generar al realizar la producción de los floculantes naturales sobre el medio ambiente.
3. Implementar sistemas de gestión de calidad al proceso productivo de floculantes naturales a escala industrial, plantear mejoras para su extracción, mejorar el rendimiento y obtener un producto con una alta calidad.
4. Utilizar floculante a partir de cladodio de nopal para aguas residuales que descarguen con pH=6 o floculante a partir de semilla de tamarindo para aguas residuales que descarguen con pH =5, con el fin de evitar el uso de ácido sulfúrico en la etapa de acondicionamiento de pH óptimo de operación.
5. Realizar investigaciones posteriores para evaluar el poder floculante en aguas residuales de otras industrias, como lo serían aguas residuales procedentes de industrias alimentarias.
6. Evaluar en futuras investigaciones la cuantificación de los lodos generados en el agua residual tratada con floculantes naturales, y compararlos con los obtenidos utilizando un floculante químico (PAC).

BIBLIOGRAFÍA

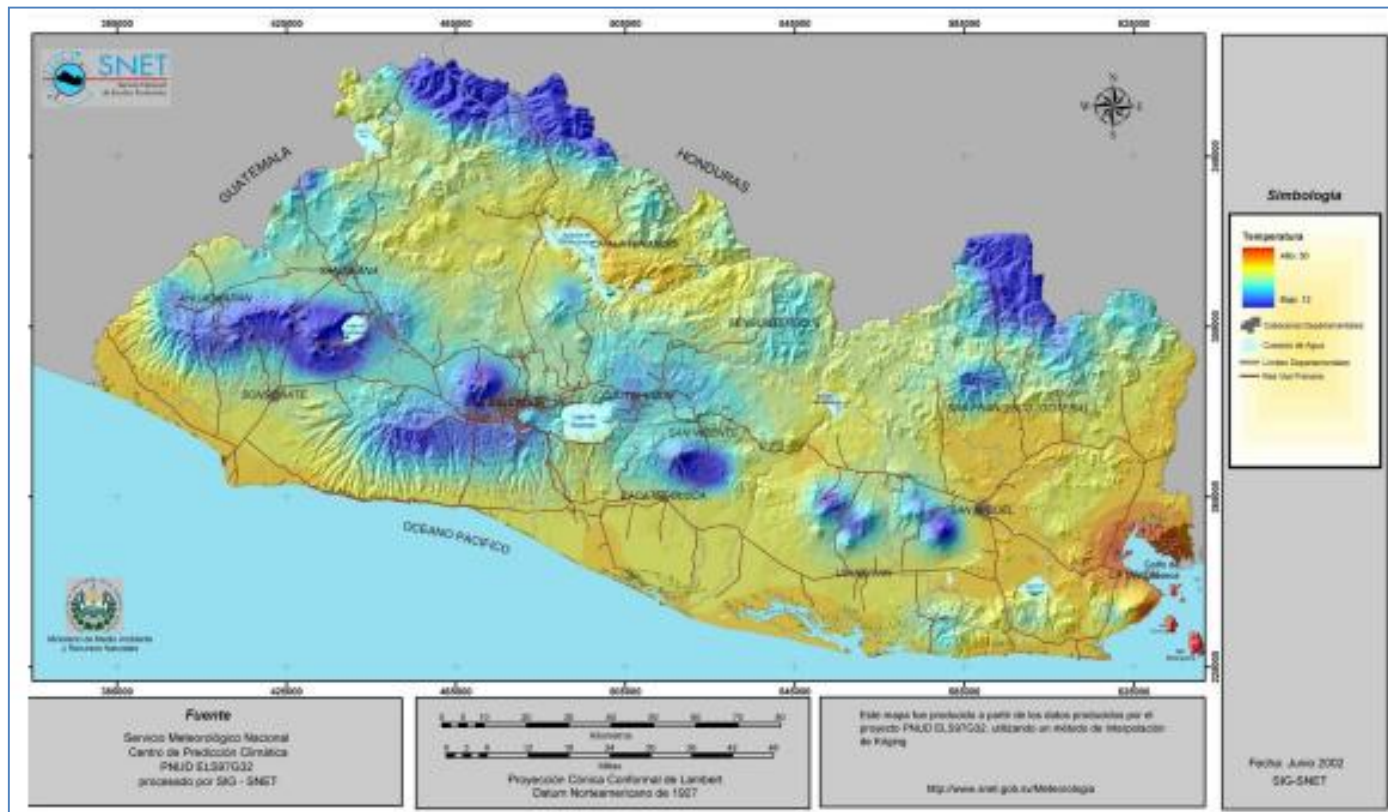
1. Saavedra, Mario. (2016). Extracción y caracterización del aceite esencial de las semillas de Tamarindo (*Tamarindus indica*) (Tesis de pregrado). Universidad Señor de Sipan, Peru.
2. Kiesling, R. 1999. Nuevos sinónimos en *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae). *Hickenia* 2 (66):309-314
3. Kiesling, R C. C. 22 (1642). Origen, Domesticación y Distribución de *Opuntia ficus-indica*.
4. Guardián, R., Coto, J,. (2011). Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo en la coagulación-floculación de aguas residuales. Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 24(2): P.18-26.
5. Bonilla, A. (1996). Determinación del contenido de proteínas, grasas y sodio en sopas deshidratadas de mayor consumo en el área metropolitana de San Salvador. Trabajo de graduación Lic. en Química y Farmacia. San Salvador. Universidad de El Salvador.
6. Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica y Análisis Sectorial Dirección Ejecutiva de Análisis Sectorial (Julio 2011). Monografía del Nopal y la Tuna Monografía del Nopal y la Tuna
7. Reynolds, S.G., y E.A. Jiménez. 2003. El nopal (*Opuntia* spp.) como forraje. Estudio FAOproducción y protección vegetal 169, México.
8. Villabona Ortiz, A., Paz Astudillo, I. C., y Martínez García, J (2013). Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para uso como coagulante natural. *Characterization of Opuntia ficus-indica for using as a natural coagulant*. 15(1), 137-144.
9. Walkington, D. L. 1968. The taxonomic history of Southern California Prickly Pears. *Cactus Succ.* 40:186-192

10. Martínez García, J., González Silgado, L. E (2012) Evaluación del poder coagulante de la tuna (*Opuntia ficus indica*) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas.

11. Apoyos y Servicios a la comercialización agropecuaria (ASERCA). Mercado Mundial de la tuna. [Internet]. 1995. [Consultado el 30 de abril de 2017]. Disponible en: <http://www.aserca.gob.mx/secsa/estudios/tuna.pdf>

12. Fruits for the Future. 1. Revised edition. Tamarind. (*Tamarindus indica* L.) By K. El-Siddeg, H. P. M. Gunesana, B. A. Prasad, D. K. N. G. Pushpukumara, K. V. R. Ramana, P. Vijayanand and J. T. Williams. Southampton, UK: Southampton Centre for Underutilized Crops (2006), pp. 188, available free on request to national scientists of developing countries. ISBN 854328599 - | Experimental Agriculture | Cambridge Core. (s. f.). Recuperado 19 de mayo de 2017, a partir de <https://www.cambridge.org/core/journals/experimental-agriculture/article/fruits-for-the-future-1-revised-edition-tamarind-tamarindus-indica.edu>

ANEXO 1



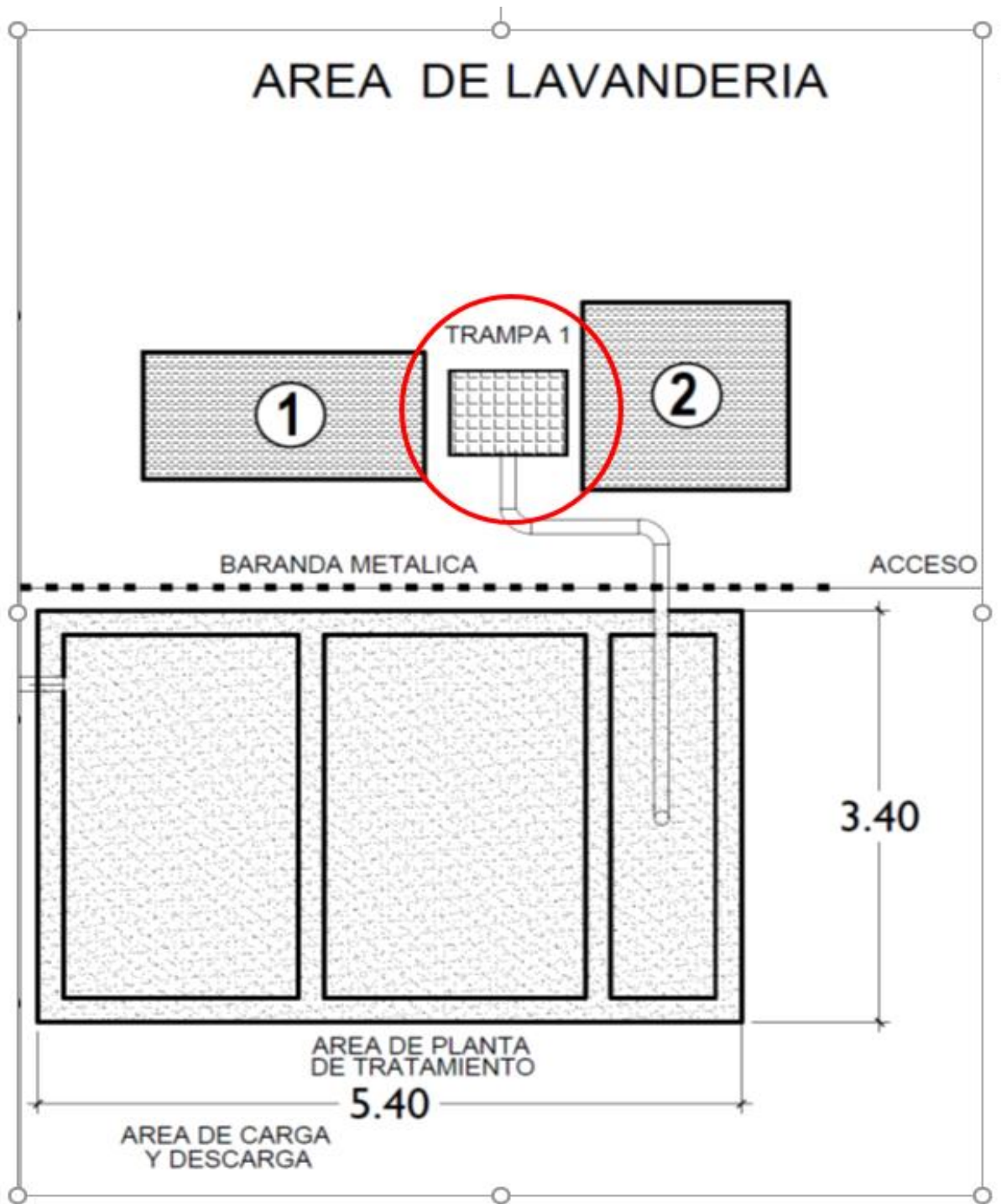
Anexo 1. Mapa de temperaturas promedio de El Salvador

ANEXO 2



Anexo 2. Mapa de promedio anual de humedad relativa en El Salvador

ANEXO 3



 Punto de muestreo

ANEXO 4

Anexo 4.1 DETERMINACIÓN DE SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN AGUA SECADOS 103° C – 105° C

Procedimiento:

- 1) Preparación del filtro: Siempre maneje el filtro mediante pinzas metálicas y/o micro espátula metálica. No manipule el filtro con la mano.
- 2) Lave el disco con tres porciones sucesivas de 20 mL de agua destilada, medidos con probeta.
- 3) Cuidadosamente y con la ayuda de una micro espátula o de unas pinzas, retire el filtro y colóquelo dentro de la cápsula de aluminio correspondiente.
- 4) Seque el conjunto (cápsula de aluminio + filtro) en el Horno precalentado a 105°C por 1 h.
- 5) Lleve el conjunto a un desecador y deje enfriar aproximadamente por 15 minutos, hasta temperatura ambiente.
- 6) Pese y registre el peso del conjunto el cual será el valor Tara 1.
- 7) Repita el ciclo de secado, enfriado y pesado. Registre el nuevo peso: tara 2.
- 8) La máxima variación aceptada en el peso del conjunto es de cinco unidades en la cuarta cifra decimal. Si se cumple con este requisito se puede decir que se ha alcanzado peso constante. En caso contrario se debe someter a un nuevo ciclo desecado hasta que se cumpla con el requisito anterior.
- 9) Agite invirtiendo el recipiente de la muestra de agua residual varias veces.
- 10) De la muestra recién agitada, tome rápidamente una alícuota medida con probeta, transfiera cuantitativamente al filtro y registre el volumen total filtrado.
- 11) Retire cuidadosamente el filtro con ayuda de una micro espátula y colóquelo en la cápsula de aluminio correspondiente.
- 12) Seque el conjunto en el Horno a 103-105°C, durante 1 hora.

- 13) Lleve el conjunto a un desecador y deje enfriar aproximadamente por 15 minutos, hasta temperatura ambiente.
- 14) Pese y registre el peso: Peso 1.
- 15) Repita el ciclo de secado, enfriado y pesado. Registre el nuevo peso: peso2.
- 16) La máxima variación aceptada en el peso del conjunto es de cinco unidades en la cuarta cifra decimal. Si se cumple con este requisito se puede decir que se ha alcanzado peso constante. En caso contrario se debe someter a un nuevo ciclo de secado hasta que se cumpla con el requisito anterior.

Efectúe los cálculos por medio de la ecuación:

$$SST = \frac{(A - B)1000}{V}$$

Donde:

SST: Sólidos Suspendidos Totales, en mg/L

A: Peso final del conjunto (filtro + cápsula de aluminio) con el residuo seco, en mg.

B: Peso inicial del conjunto (filtro + cápsula de aluminio), en mg.

V: Volumen de muestra filtrada, en mL.



F - 09



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

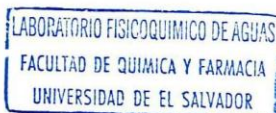
CODIGO N° 33-17		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: OSCAR ALBERTO GUARDADO PACHECO. COLONIA LA REINA, AVENIDA GUATEMALA # 14. SAN SEBASTIAN SALETRILLO. SANTA ANA.					Pág. 1 de 1
Descripción de muestra: AGUA RESIDUAL CON TRATAMIENTO					N° DE MUESTRAS: 1
Lugar de toma de muestra: LAVANDERIA INDUSTRIAL, SAN SALVADOR.					
Fecha de elaboración del informe: MARTES, 25 DE JULIO DE 2017					
Fecha de recepción de muestra: 19 DE JULIO DE 2017			Fecha de Análisis: DEL 19 AL 24 DE JULIO DE 2017		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma Salvadoreña Agua. Agua Residuales descargadas a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Método de Winkler. Modificación de la Azida de Sodio	33-17	Agua Residual: Lavandería Industrial	750.5 mg/L	100 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Fotométrico			1350 mg/L	300 mg/L
Observaciones: - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.					

Advertencia: Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

NOTA: - El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
- Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.
- El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: quejas.sgc.lfqa@gmail.com.

FECHA DE ENTREGA: 28 JUL 2017


Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras
Jefe del Laboratorio y Analista




Lic. Rosa Mirian Rivas de Lara
Analista

FIN DEL REPORTE

ach*

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa_ues@yahoo.com

Anexo 4.2 Resultados de los análisis químicos del agua residual cruda

Anexo 4.3 Resultados de los análisis químicos del agua residual tratada con floculante de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)

F - 09

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

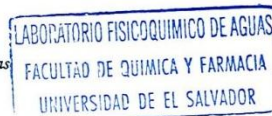
CODIGO Nº 33-17		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: OSCAR ALBERTO GUARDADO PACHECO. COLONIA LA REINA, AVENIDA GUATEMALA # 14. SAN SEBASTIAN SALETRILLO. SANTA ANA.					Pág. 1 de 3
Descripción de muestra: AGUA RESIDUAL CON TRATAMIENTO				Nº DE MUESTRAS: 3	
Lugar de toma de muestra: LAVANDERIA INDUSTRIAL, SAN SALVADOR.					
Fecha de elaboración del informe: MARTES, 25 DE JULIO DE 2017					
Fecha de recepción de muestra: 19 DE JULIO DE 2017			Fecha de Análisis: DEL 19 AL 24 DE JULIO DE 2017		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma Salvadoreña Agua. Agua Residuales descargadas a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBOs)	Método de Winkler. Modificación de la Azida de Sodio	33-17-01	Agua Residual: Lavandería Industrial tratada con floculante de tamarindo	150 mg/L	100 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Fotométrico			478.5 mg/L	300 mg/L
Observaciones: - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.					

Advertencia: Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

- NOTA:** - El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
- Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.
- El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: quejas.sgc.lfqa@gmail.com.

FECHA DE ENTREGA: 28 JUL 2017


Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras
Jefe del Laboratorio y Analista




Lic. Rosa Mirian Rivas de Lara
Analista

FIN DEL REPORTE

acel*

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa_ues@yahoo.com



F - 09



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS

CODIGO N° 33-17		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: OSCAR ALBERTO GUARDADO PACHECO. COLONIA LA REINA, AVENIDA GUATEMALA # 14. SAN SEBASTIAN SALETRILLO. SANTA ANA.					Pág. 3 de 3
Descripción de muestra: AGUA RESIDUAL CON TRATAMIENTO					N° DE MUESTRAS: 3
Lugar de toma de muestra: LAVANDERIA INDUSTRIAL, SAN SALVADOR.					
Fecha de elaboración del informe: MARTES, 25 DE JULIO DE 2017					
Fecha de recepción de muestra: 19 DE JULIO DE 2017			Fecha de Análisis: DEL 19 AL 24 DE JULIO DE 2017		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma Salvadoreña Agua. Agua Residuales descargadas a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Método de Winkler. Modificación de la Azida de Sodio	33-17-03	Agua Residual: Lavandería Industrial tratada con floculante de Nopal	210 mg/L	100 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Fotométrico			638.5 mg/L	300 mg/L
Observaciones:					
- La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.					

Advertencia: Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

NOTA: - El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
- Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.
- El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: quejas.sgc.lfqa@gmail.com.

FECHA DE ENTREGA: 28 JUL 2017


Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras
Jefe del Laboratorio y Analista




Lic. Rosa Miriam Rivas de Lara
Analista

FIN DEL REPORTE

acl*

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa_ues@yahoo.com

Anexo 4.4 Resultados de los análisis químicos del agua residual tratada con floculante a partir de nopal (*Opuntia ficus indica*)



F - 09



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA
LABORATORIO FISCOQUÍMICO DE AGUAS

CODIGO N° 33-17		INFORME DE RESULTADOS			
Nombre y dirección del cliente: OSCAR ALBERTO GUARDADO PACHECO. COLONIA LA REINA, AVENIDA GUATEMALA # 14. SAN SEBASTIAN SALETRELLLO. SANTA ANA.					Pág. 2 de 3
Descripción de muestra: AGUA RESIDUAL CON TRATAMIENTO				N° DE MUESTRAS: 3	
Lugar de toma de muestra: LAVANDERIA INDUSTRIAL, SAN SALVADOR.					
Fecha de elaboración del informe: MARTES, 25 DE JULIO DE 2017					
Fecha de recepción de muestra: 19 DE JULIO DE 2017			Fecha de Análisis: DEL 19 AL 24 DE JULIO DE 2017		
Parámetros	Método de Análisis	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma Salvadoreña Agua. Agua Residuales descargadas a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09
		CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Método de Winkler. Modificación de la Azida de Sodio	33-17-02	Agua Residual: Lavandería Industrial tratada con policloruro de aluminio (PAC)	2.7 mg/L	100 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Fotométrico			139 mg/L	300 mg/L
Observaciones: - La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.					

Advertencia: Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

- NOTA:** - El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
- Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.
- El Laboratorio Físicoquímico de Aguas pone a su disposición la siguiente dirección electrónica para que reporte alguna no conformidad al servicio prestado: quejas.sgc.lfqa@gmail.com.

FECHA DE ENTREGA: 28 JUL 2017


Lic. Henry Alfredo Hernández Contreras
Jefe del Laboratorio y Analista




Lic. Rosa Mirian Rivas de Lara
Analista

FIN DEL REPORTE

act*

Final Avenida "Mártires Estudiantes del 30 de julio", Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador, C.A.
Teléfono Directo: 2531-2948. Correo electrónico: labfqa_ues@yahoo.com

Anexo 4.5 Resultados de los análisis químicos del agua residual tratada con PAC

ANEXO 5

Analisis fisicoquimico del Cladodio del Nopal (*Opuntia ficus-indica*)

Parametro	Valor	Valor de otros Estudios	Referencia
pH	4.42	4.25	(Rodriguez-Garcia et al. 2007)
Humedad (%)	90.23	90.83	(Almendarez, 2004)
		94	(Vasquez, 1994)
Calcio (%)	0.27	1.35	(Rodriguez-Garcia et al. 2007)
		2.71	(Vasquez, 1994)
Hierro (ppm)	32.55	12.35	(Rodriguez-Garcia et al. 2007)
		42.67	
Flavonoides (mg/g)	10.16	5.23	(Vasquez, 1994)
Saponinas (mg/g)	0.70	0.56	

Fuente: Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural (2013).