

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



T E S I S

EFFECTO DE TRES CONCENTRACIONES DE MUCÍLAGO DE TUNA (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) Y DE SAN PEDRO (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) EN LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por el Bachiller:

JHEYSER VILLANUEVA ABANTO

Asesora:

Ing. M. Sc. GIOVANA ERNESTINA CHÁVEZ HORNA

CAJAMARCA – PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

Norte De La Universidad Peruana

Fundada por ley 14015 del 13 de febrero de 1962

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Cajamarca, a los veinte y tres días del mes de octubre del año dos mil diecinueve, se reunieron en el ambiente 2C-211 de la Facultad De Ciencias Agrarias los integrantes del Jurado designado por el Consejo de Facultad de Ciencias Agrarias Según Resolución de Consejo de Facultad N° 323-2019-FCA-UNC con el propósito de evaluar la sustentación de Tesis titulada: **“EFECTO DE TRES CONCENTRACIONES DE MUCÍLAGO DE TUNA (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) Y DE SAN PEDRO (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) EN LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA”**, la misma que fue sustentada por la Bachiller **JHEYSER VILLANUEVA ABANTO**, para optar el título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.

A las dieciocho horas con ocho minutos y de acuerdo a lo estipulado en el reglamento de respectivo, el Presidente del Jurado dio por iniciado el acto. Después de la exposición del trabajo de Tesis, la formulación de preguntas y de la deliberación del Jurado, el Presidente anunció la aprobación por unanimidad con el calificativo de dieciséis (16).

Por lo tanto, el graduado queda expedito para que se le expida el **Título Profesional** correspondiente.

A las diecinueve horas y quince minutos, el Presidente del Jurado dio por concluido este acto académico.

Cajamarca 23 de Octubre del 2019

Dr. Juan Francisco Seminario Cunya
Presidente

Dr. Manuel Salomón Roncal Ordóñez
Secretario

Ing. José Lizandro Silva Mego
Vocal

Ing. M.Sc. Giovana Ernestina Chávez Horna
Asesor

DEDICATORIA

A mis padres, por inculcarme una formación en valores y darme el aliento necesario para formarme como un profesional y por su apoyo para lograr este trabajo propuesto.

A todos mis amigos que contribuyeron a que este trabajo sea realizado.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida y la oportunidad de llegar hasta esta etapa de mi vida y por demostrarme su amor y protección.

A mis padres Juanita Abanto Rubio y Marcial Villanueva Atalaya; por inculcarme una formación en valores y darme el aliento necesario para formarme como un profesional.

A Josefina Pérez Machuca por su motivación para salir adelante. Asimismo a mis tías Madilene, Emerita y Elizabeth, por su apoyo en la ejecución del presente trabajo.

A mi esposa Lizbeth Escobal Pérez y a mi hijo Jhoshua Andree Villanueva Escobal, que son mi razón de ser y motivo para seguir escalando.

A la Ing. Giovana Ernestina Chávez Horna por su tiempo dedicado como asesor y aporte constructivo e instructivo en el presente trabajo.

A todos los docentes de mi alma mater, la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental Sede Celendín - Universidad Nacional de Cajamarca, por haberme brindado los conocimientos para desempeñarme como profesional.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Formulación del problema	2
1.2. Objetivos de la investigación	2
1.3. Hipótesis de la investigación.....	2
CAPÍTULO II	3
REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Bases teóricas	5
2.2.1. Mucílago	5
2.2.2. Mecanismos de la remoción de la turbiedad.....	5
2.2.3. Coagulación	5
2.2.4. Coagulantes naturales	6
2.2.5. Etapas de la coagulación	7
2.2.6. Factores que afectan la coagulación de la turbiedad.....	7
2.2.7. Flocculación	9
2.2.8. Procesos de flocculación	9
2.2.9. Sedimentación.....	9
2.2.10. Prueba de jarras	11
2.2.11. Clarificación de agua	11
2.2.12. <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.....	12
2.2.13. <i>Echinopsis pachanoi</i> (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley	15

CAPÍTULO III	18
MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Ubicación geográfica del trabajo de investigación	18
3.2. Materiales	18
3.3. Metodología	19
3.3.1. Trabajo de campo	19
3.3.2. Trabajo de laboratorio	19
3.3.3. Proceso de clarificación de agua turbia	22
3.3.4. Factores de tratamiento en estudio	22
3.3.5. Diseño experimental	23
3.3.6. Trabajo de gabinete	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1. Remoción de turbiedad	25
4.2. pH	25
4.3. Sólidos disueltos	32
4.4. Conductividad eléctrica	33
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
5.1. Conclusión	35
5.2. Recomendación	35
CAPÍTULO VI	36
BIBLIOGRAFÍA	36
ANEXOS	43
GLOSARIO	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de la paleta de tuna de distintas edades (porcentaje materia seca)	14
Tabla 2. Combinaciones de factores de tratamientos.....	23
Tabla 3. Análisis de varianza de un factor con varias muestras, prueba de F para la capacidad de clarificación de agua turbia.	24
Tabla 4. Remoción de turbiedad en cada unidad de análisis con el mucílago deshidratado de tuna	25
Tabla 5. Análisis de varianza para la capacidad de remoción de turbiedad de las especie de tuna	26
Tabla 6. Remoción de turbiedad con la especie de cactus tuna.....	26
Tabla 7. Prueba de rango múltiple de Duncan alfa = 0.05.....	27
Tabla 8. Remoción de turbiedad en cada unidad de análisis con el mucílago deshidratado de San Pedro	27
Tabla 9. Análisis de varianza para la capacidad de remoción de turbiedad de las especie de San Pedro	28
Tabla 10. Remoción de turbiedad con la especie de cactus San Pedro.....	28
Tabla 11. Prueba de rango múltiple de Duncan alfa = 0.05.....	29
Tabla 12. Porcentaje de remoción de turbiedad, obtenida del ordenamiento de datos consumados de los tratamientos.	30
Tabla 13. Datos obtenidos de mediciones de pH en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.	31
Tabla 14. Datos obtenidos de sólidos disueltos en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.	32
Tabla 15. Datos obtenidos de las mediciones de conductividad eléctrica en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.	33
Tabla 16. Ordenamiento de datos por consumación de tratamientos y repeticiones y sus promedios para turbiedad.	43
Tabla 17. Datos obtenidos de mediciones de pH en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.	44
Tabla 18. Datos obtenidos de sólidos disueltos en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.	45

Tabla 19. Datos obtenidos de las mediciones de conductividad eléctrica en las unidades experimentales tratadas con diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro	46
Tabla 20. Datos obtenidos antes y después de realizar el proceso de secado del mucilago	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases de la coagulación (Fuente: Tomado de Andía 2000).....	7
Figura 2. Partes de la tuna 1) paleta, 2) espinas,	13
Figura 3. San Pedro.....	15
Figura 4. Ubicación del clorénquima (parénquima clorofiliano) donde es producida la mescalina (Fuente: Tomado de CITES 2013: 186)	16
Figura 5. Formula química de la mescalina $C_{11}H_{17}NO_3$	16
Figura 6. Cactus de San Pedro (<i>Echinopsis pachanoi</i> (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley)	19
Figura 7. Cactus de tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller)	19
Figura 8. Paleta de la tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller)	20
Figura 9. Despojo de la epidermis de la paleta de la tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller)	20
Figura 10. Obtención del mucílago.....	20
Figura 11. Deshidratado de mucílago en estufa a 65° C	21
Figura 12. Molienda y obtención del mucílago	21
Figura 13. Proceso de coagulación-floculación.....	22
Figura 14. Porcentaje de remoción	26
Figura 15. Porcentaje de remoción con la especie San Pedro	29
Figura 16. Remoción de turbiedad lograda en cada unidad experimental	43
Figura 17. Medición del pH, usando las diferentes concentraciones de mucílago deshidratado.....	44
Figura 18. Comportamiento de los niveles de mucilago en cada una de las dos especies estudiadas para sólidos disueltos	45
Figura 19. Análisis de varianza para el indicador de conductividad eléctrica	46
Figura 20. Alcaloides presentes en el San Pedro	47
Figura 21. Estructura de los alcaloides presentes en el San Pedro	47
Figura 22. Obtención y pesado del mucílago en fresco de San Pedro	49
Figura 23. Obtención y pesado del mucílago en fresco de tuna	49
Figura 24. Muestras del mucílago en seco de tuna y San Pedro.	49
Figura 25. Molienda del mucílago para la preparación de la solución, para realizar los diferentes tratamientos	50

Figura 26. Proceso de clarificación usando las diferentes soluciones de mucílago de tuna.	50
Figura 27 . Turbidímetro utilizado para medir la turbiedad de las muestras tratadas con los cactus tuna y San Pedro.	51
Figura 28. Equipo utilizado para determinar sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica, temperatura, pH de cada muestra tratada	51

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar el efecto de los mucílago deshidratado de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y de San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley), en la clarificación de agua turbia, utilizando tres concentraciones 0.75 g/L, 1 g/L y 1.25 g/L, mediante la adecuación de la metodología de prueba de jarras. Para el análisis del efecto de ambas especies, se tuvo en cuenta el rango de turbiedad de la muestra inicial (500 a 1000 UNT), extracción de mucílago deshidratado y el tiempo de remoción (30 minutos). Los resultados obtenidos demuestran la efectividad de ambas especies como clarificadores, mostrando valores de porcentaje de remoción de turbiedad en un rango de 62 % a 90 % para la tuna y de 60 % a 78 % para el San Pedro. Con tuna, la conductividad eléctrica se incrementa de 170 a 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el pH disminuyen de 7.6 a 6.7; con el San Pedro se incrementa la conductividad eléctrica de 186 a 962 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los valores de pH disminuyen de 7.8 a 6.1. Se determinó que la concentración óptima es 1.25 g/L para cada especie y el cactus más efectivo es la tuna, lo que indica su posible aplicación para el tratamiento de aguas turbias.

Palabras claves: Concentración, mucílago, clarificación, tuna, San Pedro

ABSTRACT

This research work aimed to determine the effect of dehydrated prickly pear mucilages (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) and San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & GD Rowley), in the clarification of cloudy water, using three concentrations 0.75 g / L, 1 g / L and 1.25 g / L, by adapting the jug test methodology. For the analysis of the effect of both species, the turbidity range of the initial sample (500 to 1000 UNT), dehydrated mucilage extraction and removal time (30 minutes) were taken into account. The results obtained demonstrate the effectiveness of both species as clarifiers, showing values of turbidity removal percentage in a range of 62% to 90% for prickly pear and 60% to 78% for San Pedro. With prickly pear, the electrical conductivity increases from 170 to 710 $\mu\text{S} / \text{cm}$ and the pH decreases from 7.6 to 6.7; With San Pedro, the electrical conductivity is increased from 186 to 962 $\mu\text{S} / \text{cm}$ and the pH values decrease from 7.8 to 6.1. The optimum concentration was determined to be 1.25 g / L for each species and the most effective cactus is the prickly pear, which indicates its possible application for the treatment of turbid waters.

Keywords: Concentration, mucilage, clarification, prickly pear, San Pedro

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Para lograr la potabilización del agua es necesario someterlo a varios procesos elementales, los cuales pueden comprender desde la sedimentación, clarificación, desinfección, para finalmente lograr el acondicionamiento tanto de manera química como organoléptica. En el Perú el tratamiento de aguas para consumo humano, es nulo o muy pocas comunidades rurales o centros poblados tienen una planta de tratamiento de agua potable; el consumo es directamente de la fuente mediante capitaciones rústicas, realizando procesos cortos y rudimentarios de sedimentación de sólidos y desinfección, poniendo en riesgo la salud de los pobladores (Silva 2017).

Elevados niveles de turbidez pueden proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro. En muchos casos no se logra destruir los patógenos y las bacterias fecales, aglomerados o absorbidos por partículas. Diversas sustancias químicas peligrosas como metales pesados, organoclorados y otros se unen sobre todo a los ácidos húmicos y otras partículas orgánicas (Sáenz 2004). Todos estos riesgos se acentúan cuando la turbidez es superior a 5 UNT (unidades nefelométricas de turbidez), valor que no debe sobrepasar ninguna muestra. Por lo tanto, la turbidez debe ser baja para que la desinfección sea eficaz y que bajen los riesgos de que el agua potable vehiculice tóxicos que se manifiesten en diversas enfermedades crónicas (OMS 1998). El mucílago, tiene la propiedad de atrapar los contaminantes del agua y a su vez actúa reemplazándolos por nutrientes naturales, al tiempo que elimina olores, regula el pH y proporciona buen sabor (Cogollo 2010).

En el presente trabajo de investigación, se ha propuesto ver el efecto de dos especies de plantas mucilaginosas: la tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y la especie San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) en la clarificación de las aguas, evaluando tres concentraciones (0.75g/L, 1.0g/L, 1.25g/L) de mucílago, como coagulante de origen vegetal.

1.1. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto del mucílago de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y de San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) en la clarificación de agua turbia?

1.2. Objetivos de la investigación

Evaluar el efecto de tres concentraciones de mucílago de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y de tres concentraciones de San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) en la clarificación de agua turbia.

1.3. Hipótesis de la investigación

Las concentraciones de los mucílago de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y de San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) tienen efectos similares en la remoción de turbiedad logrando una eficiente clarificación de agua turbia.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Martínez (2012) realizó evaluaciones sobre el poder coagulante de la tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) para la remoción de turbiedad y color en aguas crudas. Extrajo el coagulante en polvo, de la penca de tuna y evaluó su efectividad en la remoción de turbiedad en aguas crudas de un canal en Cartagena-Colombia. Los resultados de las corridas en las pruebas de jarras demostraron una eficiencia del 85.76% de remoción de turbiedad presentes en el agua cruda, utilizando dosis similares a la de los coagulantes metálicos con mayor uso en la actualidad en los tratamientos de agua. El coagulante natural no le confirió ningún olor o mal sabor al agua, el análisis demostró que posee una densidad menor a la del agua, un pH ácido y alto grado de carbohidratos del cual afirma que es un polielectrólito.

Silva (2017) en su investigación sobre la caracterización del mucílago de tuna, determina que los límites de humedad, que varía entre 56 a 74%, proteínas de 1.9 a 4.10%, cenizas de 1.44 a 2.20%, grasas de 0.07 a 0.1% y carbohidratos de 20.21 a 39%. Relacionando estos resultados con el rendimiento de extracción, con respecto a la aplicación del mucílago extraído en el proceso de clarificación de aguas turbias, considerando como factores a la turbiedad inicial con niveles de 500 UNT y 1000 UNT y la concentración del mucílago con niveles de 30 ppm y 50 ppm, se obtiene la máxima remoción de turbiedad en un intervalo de 86 % a 88.9 %, cuando la turbiedad es de 1000 UNT.

Quispe (2012) en su investigación presenta resultados de la obtención y aplicación del polímero natural extraído de las pencas de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) como mucílago fresco obtenido a través de una maceración y como mucílago seco empleando las operaciones de molienda y filtración. El mucílago fresco y seco se utilizó como coagulante natural en aguas del río Uchusuma, Captación de Cerro Blanco Tacna-Perú; evaluando la eficiencia como agente clarificante. Los ensayos se realizaron a escala de laboratorio, preparando aguas turbias artificiales con valores de turbiedad iniciales de 3,26 a 1000 UNT, indicando que el mucílago fresco remueve la turbiedad entre un 95,39% y 92,36% al tratar turbiedades iniciales altas y entre un 25 y 19% a turbiedades medias;

con mucílago seco remueve entre un 82.41% en turbiedades altas y 75.46 en turbiedades medias.

Urquía (2017) presenta la eficiencia de la tuna frente a las semillas de Moringa Oleífera en el tratamiento de aguas del Río Huaycoloro, Lima. Usó concentraciones de 0.75 g/L, 1 g/L y 1.25 g/L, logrando porcentajes de remoción de 97, 38% con la mayor dosis para la tuna y del 82 % con la moringa. Con la menor concentración logra remover 67,3 % con la tuna y 68 % con la moringa; así mismo con la concentración de 1 g/L logra una remoción de 76 % y de 74 % con la moringa, este tratamiento es llevado a cabo mediante el método de prueba de jarras a una velocidad rápida de 240 rpm por 5 minutos, una velocidad lenta de 60 rpm por 2 minutos y un tiempo de sedimentación de 30 minutos, llegando a la conclusión que tanto las semillas de moringa como el mucílago de la tuna son coagulantes naturales efectivos para remover contaminantes fisicoquímicos en aguas, siendo más eficiente la tuna.

López (2000), utilizando la tuna, logra obtener porcentajes de remoción de turbidez mayor a 90 %, además, afirma que los coagulantes naturales poseen propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades. Saenz *et.al*, (2004), atribuyen la capacidad de coagulación del *Opuntia ficus-indica*, a la presencia del mucílago, que es un complejo viscoso con la capacidad de retener agua, hecha de moléculas de carbohidratos tales como: arabinosa, galactosa, ramnosa, xilosa y ácido galacturónico. A partir del mucílago han extraído el ácido galacturónico como agente predominante en el proceso de coagulación. Aunque la óptima coagulación de turbiedad con *Opuntia* podría atribuirse a las composiciones totales de arabinosa, galactosa y ramnosa quienes logran una efectiva reducción de contaminantes y un rendimiento en el proceso de la coagulación, reteniendo partículas suspendidas causantes de turbiedad (Pérez 2005).

Catillo y Silva (2018) presenta, la eficiencia de la tuna como coagulante-floculante en la remoción de turbidez, usando concentraciones de tuna de 1.25 g/L y 1.50 g/L; logrando porcentajes de remoción de 91 % y 98 %, en turbiedades iniciales de 715 UNT.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Mucílagos

Son sustancias análogas a las gomas, en contacto con el agua forman unas dispersiones viscosas y poseen una facilidad de embeberla; propiedad de importancia en el mecanismo de retención del agua de las cactáceas. Están contenidos dentro de las células vesiculares de los parénquimas (Sáenz 2004).

Estas sustancias se disuelven en agua para dar soluciones mucilaginosas o geles que son ampliamente usadas como adhesivos o agentes aglomerantes. Las gomas y mucílagos pueden ser definidos como sustancias originadas en las plantas, los cuales son obtenidos como exudación de los frutos, tronco o ramas de las plantas, en forma espontánea o después de una herida mecánica por incisión de un objeto punzante, remoción de alguna rama o invasión por bacterias o insectos (Miller 2008).

2.2.2. Mecanismos de la remoción de la turbiedad

Son los mecanismos que inducen la coagulación-floculación de la turbiedad, la máxima remoción ocurre cuando la carga de las partículas está cerca del punto isoeléctrico, pero casi nunca exactamente en el punto isoeléctrico. La cantidad de coagulantes metálicos necesarios para remover el color es directamente proporcional a la cantidad de color removido (Espinoza 2006).

La turbiedad puede ser removida por adsorción química en los precipitados poliméricos de los productos de hidrólisis de los coagulantes, formándose una interacción entre estos y los grupos carboxílicos de las moléculas orgánicas que producen el color, esto ocurre en aguas alcalinas. Cuando en el color del agua está presente la turbiedad, la superficie de los coloides se incrementa y con esto se estimula la adsorción de las moléculas que causan el color del líquido, lo que implica una menor dosis de coagulantes (Kirchmer 1973).

2.2.3. Coagulación

La coagulación y floculación son métodos que se emplean para remover del agua la materia coloidal y la suspendida (tamaño de 1 nm a 0,1 nm). La estabilidad de la materia suspendida se debe a la repulsión entre partículas inducida por el alto potencial zeta

(15 a - 20 mv). Esta materia no sedimenta fácilmente y no puede ser removida por métodos físicos convencionales (José y Flores 2000)

El objetivo principal de la coagulación es desestabilizar los coloides debido a que disminuye el potencial zeta de las partículas mediante la adición de coagulantes. Esta desestabilización se produce por el contacto que se establece entre las partículas suspendidas (coloidales) y los microfloculos de carga positiva. El punto óptimo para la coagulación es cuando el potencial zeta alcanza su más bajo nivel, o punto isoeléctrico, prevaleciendo las fuerzas de Van der Waals. La coagulación no solo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos (Osorno 2009).

2.2.4. Coagulantes naturales

Campos *et al.* (2003) menciona que los coagulantes naturales, garantiza la inocuidad para el ser humano. En la actualidad, el uso de coagulantes de origen sintético para la potabilización de agua, tales como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico (Boisvert 1998), es cuestionada debido entre otros motivos a los problemas medioambientales que conlleva, la generación de lodos tóxicos que no pueden ser utilizados en la agricultura; la relación con la enfermedad de Alzheimer (Alfrey 1976); empeoramiento de enfermedades neurodegenerativas relacionadas con el cáncer (Miller 2008).

Son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal, que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbiedad inicial de ésta. Algunos de estos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos (Ganjidoust 1997).

Según Cogollo (2010), son macromoléculas, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de 106 a 107 g/mol, estos se clasifican de acuerdo a la ionicidad de los polímeros: Aniónicos (generalmente copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico), neutros o no iónicos (poliacrilamidas), catiónicos (copolímero de acrilamidas + un monómero catiónico). Para este tipo de polielectrolitos, se debe considerar la toxicidad del producto, los monómeros acrílicos son tóxicos al sistema nervioso y pueden estar presentes en los productos comerciales (Coto 2011).

2.2.5. Etapas de la coagulación

Crapper (1992) sostiene que el proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas.

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión
- Formación de Compuestos químicos poliméricos
- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides
- Adsorción mutua de coloides
- Acción de barrido

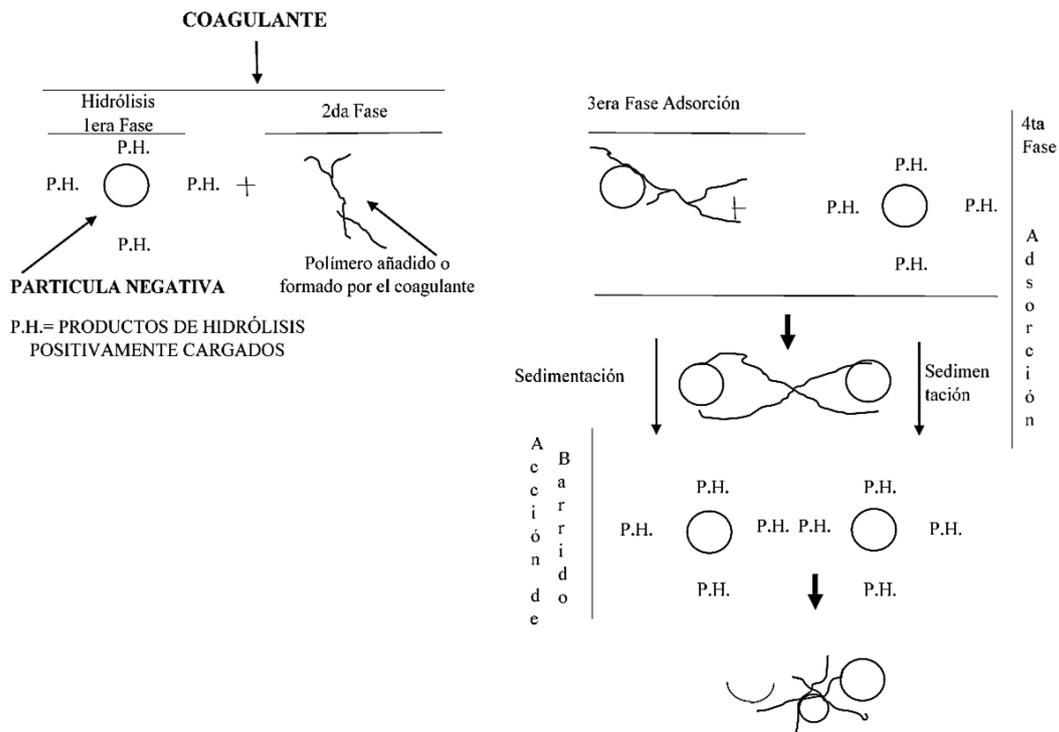


Figura 1. Fases de la coagulación (Fuente: Tomado de Andía 2000)

2.2.6. Factores que afectan la coagulación de la turbiedad

La coagulación del color es un fenómeno complejo donde intervienen factores que pueden modificarlo: dosis de coagulantes; pH; concentración de coloides o turbiedad; concentración de sustancias orgánicas en el agua; iones disueltos presentes; intensidad de la mezcla rápida y gradiente de velocidad de la mezcla lenta; movilidad electroforética de las partículas y la temperatura (Romero 2002).

- **Influencia del pH**

El pH es una variable importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. El rango de pH está en función al tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo (6-8) entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto, la dosis requerida es alta (Martínez 2012).

- **Influencia de la temperatura del agua**

La variación de 1 °C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; a medida que la temperatura del agua se acercaba a los 0°C la remoción de turbiedad se dificulta y a temperaturas cercanas a 40°C desfavorecen igualmente a la coagulación (Castro y Gibaja 1979).

- **Influencia de la dosis de coagulante**

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación; es decir poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microfloculos es muy escasa, por lo tanto, la turbiedad residual es elevada. Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de cantidad de microfloculos con tamaños pequeños cuyas velocidades de sedimentación bajas, por lo tanto, la turbiedad residual es igualmente elevada. La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de pruebas de jarra (Vázquez 2003).

- **Influencia de la mezcla**

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecha, produciendo la reacción química de neutralización de cargas. En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas; la mezcla enérgica de corta duración (60 seg. máx.)

llamado mezcla rápida que tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen de agua a tratar y la mezcla lenta, en donde se desarrolla los microflóculos, para seguir con el proceso de sedimentación (Arboleda 2000).

2.2.7. Floculación

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación; consiste en la agitación de la masa coagulada permitiendo el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. (Carranza 2008). Es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos, este proceso puede ser mejorado por la adición de un reactivo o ayudante de floculación (Contreras *et al.* 2015).

2.2.8. Mecanismo de floculación

Arboleda (2000) indica que normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- 1) Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido, producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.
- 2) Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico. Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego se produce la floculación Ortocinética.
- 3) Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

2.2.9. Sedimentación

Se define como el mecanismo mediante el cual las partículas suspendidas se separan por fuerzas de gravedad. La coagulación y floculación implica la adición de compuestos que inducen la rápida agregación y sedimentación de las partículas suspendidas (Torres 2012).

Pérez (2005) define como "sedimentación" al proceso natural por el cual las partículas más pesadas que el agua, son removidas por la acción de la gravedad, en un determinado intervalo de tiempo, no todas las partículas en suspensión sedimentan, solo aquellas de menor peso específico que el fluido.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación, está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada (Pérez 2005).

Tipos de Sedimentación

Las partículas en suspensión sedimentan en diferentes formas, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración (Torres 2012).

- **Sedimentación de partículas discretas**

Se refiere a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída.

- **Sedimentación de partículas floculentas**

Partículas floculantes son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas (forma, tamaño, densidad) si cambian durante la caída. Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida (Pérez 2005).

- **Sedimentación por caída libre e interferida**

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal (Torres 2012).

2.2.10. Prueba de jarras

Es un método de simulación de los procesos de coagulación y floculación, realizado a nivel de laboratorio que permite obtener agua de buena calidad, fácilmente separable por decantación; los flóculos formados con diferentes dosis del coagulante dan como resultado valores de turbiedad diferentes (Trachtenberg y Mayer 1981).

Las pruebas de jarras se utilizaron para la determinación de las dosis más efectivas de coagulante para una muestra de agua específica, ya que estas se utilizan comúnmente para el control del proceso de coagulación-floculación en una planta de tratamiento (Martínez 2012).

Descripción del equipo de prueba de jarras

Coto (2011) señala que, para efectuar los ensayos de simulación de procesos, existen algunas variaciones en el equipo tradicional, aunque no es un requisito indispensable, estas pruebas, en la mayor parte de los casos, son realizadas en equipos comerciales y uno de los más conocidos es el equipo de velocidad variable fabricado por la Phipps y Bird, para el cual se han desarrollado los ábacos que relacionan el gradiente de velocidad con la velocidad de rotación de las paletas. Normalmente estos equipos constan de los siguientes elementos:

- Un agitador mecánico provisto con tres a seis paletas, capaz de operar a velocidades variables (de 0 a 100 revoluciones por minuto; actualmente pueden obtenerse equipos que operan con velocidades de hasta 400 revoluciones por minuto)
- Un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador del equipo
- Vasos de precipitado de 2 L. de capacidad, de cristal refractario

2.2.11. Clarificación de agua

La clarificación del agua tiene por objeto retirar los sólidos suspendidos, sólidos finamente divididos y materiales coloidales, convirtiéndolos en partículas grandes que se pueden remover con mayor facilidad. Es un proceso utilizado tanto en sistemas de tratamiento de aguas municipales con el fin de obtener agua potable para consumo humano, como en sistemas de tratamiento de aguas industriales que comprenden el tratamiento individual del agua proveniente de acueductos municipales de acuerdo con su uso final, ya sea agua para elaboración de bebidas o alimentos (Cogollo 2010).

Es uno de los procesos importantes en la potabilización del agua, que incluyen tres subprocesos de coagulación, floculación y sedimentación. Primero, se agregan los coagulantes, que reducen la carga de iones, de modo que se acumulan las partículas en formas grandes llamadas flóculos, depositándose por gravedad en tanques de filtración o se quitan mientras que el agua atraviesa un filtro de gravedad (Cogollo 2010).

2.2.12. *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller

Planta viscosa envuelta en espinas, la llamada tuna (*Opuntia*) es natural de zonas áridas y pedregosas, en el Perú crecen en mayor parte en la región sierra, las paletas extraídos de estas plantas son usados como medicina natural, para tratar úlceras estomacales o como antiparasitario, actualmente existen más de 10 especies de tuna, las más abundantes son la tuna naranja (común) y tuna morada (*Opuntia* spp.). Los análisis recientes arrojan resultados con respecto a la alta cantidad de antraquinonas y carbohidratos que contiene esta planta, concentrándose la mayor parte en los tallos, es de gran ayuda en el proceso de coagulación y desinfección del agua (Aquino *et al.* 2012).

Clasificación científica de la tuna

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* L. El nombre *ficus-indica* había sido usado en "frases diagnósticas" ya mucho antes de Linneo, para designar varias especies (Amaya, 2009).

Descripción de la planta de la tuna

La *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, se desarrolla en climas áridos con lluvias en verano, por lo que se refiere a precipitación pluvial es poco exigente, ya que se le encuentra en zonas con lluvias de 125 o más milímetros al año, aunque los excesos de humedad pueden provocar enfermedades fungosas y daños por insectos (Amaya 2009).

La tuna son plantas arbustivas, rastreras o erectas que pueden alcanzar 3,5 a 5m de altura, su sistema radical es extenso, densamente ramificado, rico en raíces finas absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. La longitud de las raíces está en relación con las condiciones hídricas y con el manejo cultural, especialmente el riego y la fertilización (Villegas 1997).

Su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm de diámetro, sus ramas están formadas por paletas de 30 a 60 cm de largo x 20 a 40cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor. Se encuentran protegidas por una cutícula gruesa que, en ocasiones, está cubierta de cera o pelos que disminuyen la pérdida de agua, ya que poseen abundante parénquima. En este tejido se almacenan considerables cantidades de agua lo que permite a las plantas soportar largos periodos de sequía. Cabe destacar que la función de los mucílagos (hidrocoloides presentes en este tejido) es de retener agua (Nobel *et al.* 1992).

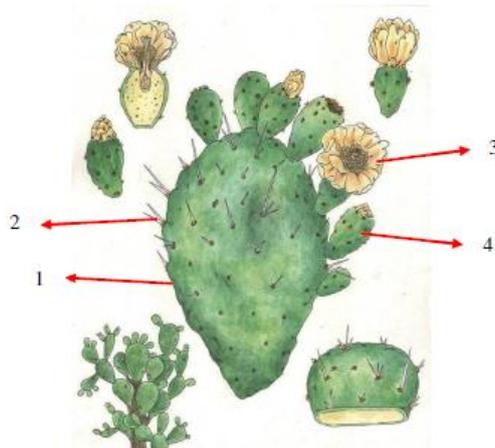


Figura 2. Partes de la tuna 1) paleta, 2) espinas, 3) flor y 4) fruto. (Fuente: Tomado de Silva 2017: 16)

Composición química general de la tuna

La Tabla 1 muestra la composición química de la tuna en fresco. La pala de tuna tiene interés desde el punto de vista industrial ya que cuando los brotes son tiernos (10-15 cm) se usan para la producción de tuna y cuando están parcialmente lignificados (paleta de 2-3 años), para la producción de harinas y otros productos. La tuna contribuye con una proporción de agua (alrededor del 90%) y son altamente cotizados por su contenido de fibra, comparable al de varias frutas y hortalizas (Ruales y Zumba 1998).

Tabla 1. Composición química de la paleta de tuna de distintas edades (porcentaje materia seca)

Edad (años)	Proteína	Grasa	Cenizas	Fibra cruda	Extracto no nitrogenado
0.5	9.4	1.00	21.0	8.0	60.6
1	5.4	1.29	18.2	12.0	63.1
2	4.2	1.40	13.2	14.5	66.7
3	3.7	1.33	14.2	17.0	63.7
4	2.5	1.67	14.4	17.5	63.9

Fuente: Tomado de López 2000:56

Son ricos en minerales, como el calcio y el potasio (93 y 166 mg/100g, respectivamente), y tienen bajo contenido de sodio (2 mg/ 100 g), volviéndose una ventaja para la salud humana. Contienen, además, cantidades moderadas de carotenoides (30 µg/100g) y vitamina C (11 mg/100g). Esta composición varía según la acidez, salinidad, conductividad, grado de disociación o ionización, humedad y textura del suelo (Rodríguez y Cantwell 1988).

El mucílago de la tuna

La tuna está caracterizada por la producción de un hidrocoloide comúnmente conocido como mucílago, es un polisacárido fibroso, de una forma altamente ramificada, pegajosa y poco manejable, que forma redes moleculares capaces de retener cantidad de agua, está compuesto por azúcares; puede contener más de 30 000 subunidades de azúcar, o residuos. Los azúcares más abundantes tienen cinco o seis átomos de carbono y son los siguientes: 24,6-42,0% de arabinosa, 21-40,1% de galactosa, 8,0-12,7% de ácido galacturónico, 7,0-13,1% de ramnosa, 22,0-22,2% de xilosa; además contiene fructosa, sacáridos y maltosa (Quispe 2012). El gel del cactus contiene proteínas y diversos polisacáridos de variada composición. (Trachtenberg y Mayer 1981; Andrade *et al.* 1992).

Jadhav y Mahajan (2014), mencionan que la extracción de los componentes activos coagulantes del cactus se ha obtenido a partir de los cladodios previamente secados y molidos hasta a un polvo fino. Los componentes *O. ficus* fue caracterizado mediante la técnica de FTIR, para identificar que grupos funcionales son activos en la actividad coagulante de metales pesados. De acuerdo a los resultados, los autores afirman que el ácido poligalacturónico es el agente activo del polvo extraído de los cladodios de *O. ficus*, el cual proporciona actividad de coagulación. La capacidad coagulante del polvo de los

cladodios de cactus han sido probados en la coagulación y floculación de iones de metales pesados como el Pb^{+2} , Zn^{+2} , Cd^{+2} y Cu^{+2} de aguas (Nharingo et al., 2015). Las condiciones óptimas que sugieren los autores son dosis de 1,8 g / L de polvo *O. ficus*, 10 mg / L de concentración de iones de metales pesados a un pH de 5 y 35°C. A partir de estas condiciones han obtenido máxima actividad de coagulación de iones Pb^{+2} con porcentajes de remoción hasta del 100%. Para la reducción de los iones Zn^{+2} , Cd^{+2} y Cu^{+2} se han obtenido valores de 86 %, 84 % y 93.02 %, respectivamente. Las diferencias de los porcentajes de coagulación de los metales pesados analizados, se debe a las propiedades físicas y químicas de los metales pesados (Nharingo y Ngwenya, 2013).

2.2.13. *Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley

Se le conoce comunmente en algunas zonas del Perú como “San Pedro”. Planta arbórea, de 3 a 6 m. de alto, ramas numerosas azul-verdoso, 6 a 8 costillas, anchas y redondeadas, con depresión transversal sobre las areolas, espinas generalmente ausentes o escasas, pequeñas, 1 cm. desiguales, amarillomarrón. Flor de 23 cm. de largo, blancas, con pelo negro (Ostolaza 2014). Distribución: Descrita en Cuenca, Ecuador, 2000-3000 m; llega a Huancabamba, Piura; Qda. Santa Cruz, Cordillera Blanca, Ancash, 3 300 m.



Figura 3. San Pedro

Acción sicotrópica del San Pedro

El análisis farmacológico del San Pedro ha revelado que contiene diversos alcaloides: entre ellos el más destacado es la mescalina o TMPE (trimetoxifeniletamina). (Bianchi 1996).

La mescalina se forma en los tejidos del “San Pedro”, fundamentalmente en la carne verde adyacente al pellejo externo, su contenido es aproximadamente de 0.12 por ciento en la planta fresca y de 2 por ciento cuando está seca, aunque su concentración es mayor en el *T. peruvianus* que en el *T. pachanoi* (Ostolaza 1995) y varía de acuerdo al lugar donde crece la planta. “Se dice que las variedades de “San Pedro” que crecen en las laderas andinas son más potentes debido a la mayor riqueza mineral del suelo.” La mescalina fue el primer “alucinógeno” purificado y estudiado farmacológicamente, lo cual permitió conocer científicamente el origen de los estados modificados de conciencia. Posteriormente, se descubre la presencia de mescalina en el San Pedro y otros cactus (Cabieses 1993).



Figura 4. Ubicación del clorénquima (parénquima clorofiliano) donde es producida la mescalina (Fuente: Tomado de CITES 2013: 186)

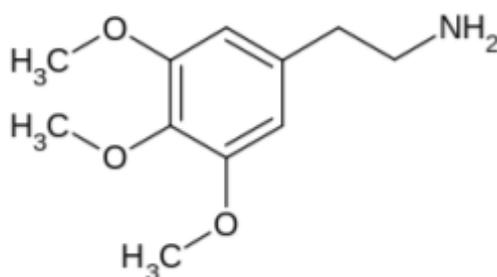


Figura 5. Fórmula química de la mescalina $C_{11}H_{17}NO_3$

Se sabe que en toda planta existen metabolitos primarios y secundarios. En el San Pedro existen, también, estas dos clases de metabolitos, tales como: ácidos grasos, resinas, heterósidos, gomas, proteínas, nucleoproteidos, hemicelulosas, etc.; también existen: carotenoides, alcaloides, taninos, saponinas, entre otros. Este estudio da como resultado un rango de 0,1 y 2,3% de alcaloides totales presentes (1,09 a 23,75 $\mu\text{g}/\text{mg}$ de cactus seco). Se puede apreciar la gran variación del contenido alcaloideo en las diversas muestras analizadas. (Ogunbodede *et al.* 2010)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica del trabajo de investigación

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de análisis ambiental de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Ambiental Sede Celendín ubicado a 06°53' de latitud sur, 78°08' de longitud oeste y 2745 msnm, tiene un clima templado, con temperaturas medias de 14°C y una precipitación media anual de 720 mm.

3.2. Materiales

3.2.1. Materiales experimentales

- Mucílago deshidratado de tuna y San Pedro

3.2.2. Materiales de campo

- GPS eTrex 20x
- Cámara fotográfica digital
- Etiquetas de identificación
- Recipientes de plástico
- Libreta de campo
- Lápiz
- Tijera
- Cuchillo

3.2.3. Materiales y equipo de laboratorio

- Agua destilada
- Guantes de seguridad
- Equipo multiparámetros.
- Turbidímetro
- Estufa WTC binder
- Balanza analítica
- Mortero de porcelana
- Mechero bunsen
- Bagueta de vidrio
- Fiola de 50mL

- Pipeta graduada de 10mL
- Espátula
- Vasos de precipitación de 3 litros
- Placa de petri
- Agitador manual

3.3. Metodología

3.3.1. Trabajo de campo

Obtención del mucílago

Se buscaron tunas con una edad entre 2 – 3 años y San Pedro, procedentes del caserío el Tingo, distrito José Gálvez, provincia Celendín y departamento de Cajamarca. Su recojo se realizó durante la mañana para evitar la pérdida de sus propiedades como coagulante-floculante.



Figura 6. Cactus de San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley)



Figura 7. Cactus de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller)

3.3.2. Trabajo de laboratorio

3.3.2.1. Extracción del mucílago de tuna y San Pedro

Para realizar la extracción del mucílago se realizó el siguiente procedimiento:

A. Acondicionado de los cactus

Se lavó con agua potable la parte del cactus a utilizar y se cepilló para retirar restos de espinas facilitando su manipulación.



Figura 8. Paleta de la tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller)

B. Extracción

Se despojó la epidermis de las paletas con la ayuda de un cuchillo, extrayendo aproximadamente 1800 gramos de mucílago en fresco por cada especie de cactus.



Figura 9. Despojo de la epidermis de la paleta de la tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller)

C. Obtención de mucílago deshidratado

- Se recolectó en placas el mucílago en fresco, las mismas que fueron llevados a la estufa a 65°C para la evaporación del agua contenida en su estructura.



Figura 10. Obtención del mucílago

- Para obtener un mucílago efectivo, capas de remover eficientemente la turbiedad, se monitoreo constantemente, evitando que se queme y pierda sus propiedades como clarificador. El secado tuvo una duración de 3 días (24 horas/día).



Figura 11. Deshidratado de mucílago en estufa a 65° C

- Se pesaron cada una de las placas, determinando la cantidad de agua evaporada y el valor real del mucílago extraído en seco (Tabla 21 anexos).
- Se recolectó en un mortero todos los residuos sobrantes en cada placa, la molienda se realizó hasta lograr la consistencia deseada, para facilitar su dilución. Para la obtención de este mucílago se hicieron diferentes pruebas a diferentes temperaturas, hasta la obtención efectiva del mismo.

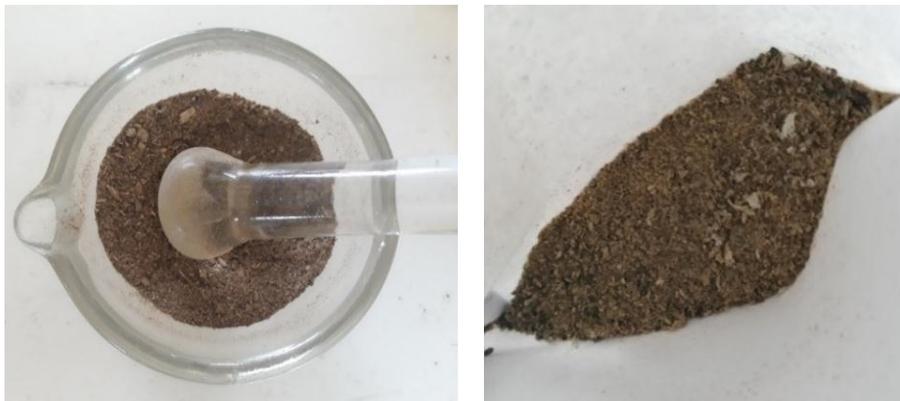


Figura 12. Molienda y obtención del mucílago

3.3.2.2.Preparación de agua turbia

Utilizando un envase de boca ancha y sustrato suelo, se preparó agua turbia con rangos de 500 – 1000 UNT.

3.3.2.3. Proceso de clarificación de agua turbia

- Previo a la adición del coagulante se determinó los siguientes parámetros: turbiedad, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y pH, usando un turbidímetro y multiparámetro debidamente calibrados (certificado de calibración ANEXOS Figura 22 y 23)
- El agua turbia fue vertida en ocho vasos de precipitación de un volumen de 2 litros, cuidando que la solución este homogénea.
- Se agregó los coagulantes naturales, según el arreglo factorial (ver paso 3.3.4.)
- Se realizó una agitación rigurosa por un tiempo de cuatro minutos (proceso de coagulación), para posteriormente dejar reposar por 30 minutos adicionales con la finalidad de favorecer la floculación y sedimentación.
- Se dejó reposar por 30 minutos para favorecer la floculación y sedimentación, para finalmente obtener la clarificación del agua incluida la muestra cero (blanco).
- Pasado los treinta minutos se volvió a medir los indicadores de turbiedad, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y pH.
- Se realizó 4 repeticiones por cada una de los tratamientos.



Figura 13. Proceso de coagulación-floculación

3.3.3. Factores de tratamiento en estudio

Factor 1: Especies de cactus

e₁ = tuna

e₂ = San Pedro

Factor 2: Concentraciones de mucílago deshidratado

$$c_0 = 0 \text{ g/L}$$

$$c_1 = 0.75 \text{ g/L}$$

$$c_2 = 1 \text{ g/L}$$

$$c_3 = 1.25 \text{ g/L}$$

Tabla 2. Combinaciones de factores de tratamientos

Clave alfabética	Clave numérica	Descripción
		Cactus / concentración
e ₁ c ₀	1	tuna / 0 g/L
e ₁ c ₁	2	tuna / 0.75 g/L
e ₁ c ₂	3	tuna / 1 g/L
e ₁ c ₃	4	tuna / 1.25 g/L
e ₂ c ₀	5	San Pedro / 0 g/L
e ₂ c ₁	6	San Pedro / 0.75 g/L
e ₂ c ₂	7	San Pedro / 1 g/L
e ₂ c ₃	8	San Pedro / 1.25 g/L

3.3.4. Diseño experimental

Se utilizó el análisis de varianza de un factor con varias muestras, obteniendo cuatro tratamientos por cada especie y 4 repeticiones por cada concentración, con un total de 8 tratamientos y 32 unidades experimentales.

Determinación del porcentaje de remoción de turbiedad

Para verificar el efecto de las concentraciones de mucílago deshidratado como clarificadores de agua turbia se analizó el porcentaje de remoción de turbiedad a través de la siguiente fórmula:

$$Remoción (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Dónde:

R (%) : Porcentaje de remoción

C_i : Medida inicial de los indicadores (turbiedad) de la muestra

C_f : Medida final de turbiedad luego de agregarle el mucílago deshidratado

3.3.5. Trabajo de gabinete

En esta etapa se contempló el análisis de los datos obtenidos durante el trabajo de laboratorio. Los resultados fueron sometidos a un Análisis de Varianza de un factor con varias muestras con un nivel de significación de 0.05. El análisis estadístico se realizó para cada una de las especies, con la finalidad de evaluar el efecto de cada concentración de mucílago deshidratado en la clarificación de agua. El esquema del análisis de varianza para este modelo se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis de varianza de un factor con varias muestras, prueba de F para la capacidad de clarificación de agua turbia.

FUENTE	GL	SC	CM	F ₀
Tratamientos (T)	$T - 1 = 3$	SC _E	M1	M ₁ /M ₂
Error experimental	$N - T = 12$	SC _{Error}	M2	
Total	$N - 1 = 15$	SC _{Total}		

Fuente: Elaborado con base en Silva 2017

El efecto de los tratamientos con las distintas concentraciones de mucilago de cada especie, fueron probados estadísticamente por la prueba de F, teniendo en cuenta que se trabajó bajo la significancia de $\alpha = 0.05$.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el trabajo de investigación se ha utilizado mucílago deshidratado de dos especies de cactus tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Friedrich & G.D. Rowley) para lograr la clarificación de agua turbia. Los resultados obtenidos en los tratamientos son expuestos bajo las formas de tablas y gráficos con sus respectivas interpretaciones.

4.1. Remoción de turbiedad por cada especie de cactus

4.1.1. Efecto del mucílago de la tuna

La Tabla 4 muestran los porcentajes de remoción de turbiedad encontrados en cada unidad de análisis al utilizar como clarificador de aguas turbias el mucílago deshidratado de tuna.

Tabla 4. Remoción de turbiedad en cada unidad de análisis con el mucílago deshidratado de tuna

Especie de cactus	Repeticiones	Porcentajes (%) de remoción de Turbiedad (UNT)			
		T1 (0 g/L)	T2 (0,75 g/L)	T3 (1.0 g/L)	T4 (1,25 g/L)
tuna	1	13	62	79	91
	2	10	75	79	91
	3	14	55	76	90
	4	12	54	76	89
	SUMA	49	246	310	361
	PROM.	12	62	78	90

Teniendo en consideración los resultados obtenidos en la Tabla 4, se realizó el análisis de variancia Tabla 5, encontrando que el presente experimento arrojó un coeficiente de variabilidad de 2.01%, que nos señala las excelentes condiciones de conducción del experimento. A continuación y al analizar las diferentes fuentes de variación se observa que: Se encuentra alta significación estadística para la fuente de variación tratamientos, lo que nos indica que debido a la ausencia de elementos clarificadores del agua, existen respuestas significativas al incorporar al agua las diferentes concentraciones de mucílago de tuna, es por lo tanto importante su incorporación en forma racional para asegurar una buena calidad del agua.

Tabla 5. Análisis de varianza para la capacidad de remoción de turbiedad de las especie de tuna

Fuentes	SC	GL	CM	Fc	Ft	Significancia
Tratamientos	14012	3	4670.75	185.90	3.49	***
E.E.	302	12	25.13			
Total	14314	15				

CV = 2.01

*** Altamente significativo

Al comprobar que el F calculado (Fc) es mayor al F tabulado (Ft), determinamos que los tratamientos son altamente significativos, demostrando estadísticamente que el mucílago deshidratado de tuna es efectivo en la clarificación de aguas turbias. Los resultados se evidencian en la Tabla 6 y Figura 14, que muestran el porcentaje de remoción alcanzado con cada concentración de mucílago deshidratado. Con la concentración de 1.25 g/L se logra 90 % de remoción de turbiedad y con las demás concentraciones el porcentaje de remoción es mayor al 50 %.

Tabla 6. Remoción de turbiedad con la especie de cactus tuna

Tratamientos	T1	T2	T3	T4
Concentración de mucílago	0.00 g/L	0.75 g/L	1.00 g/L	1.25 g/L
Porcentaje de remoción	12	62	78	90

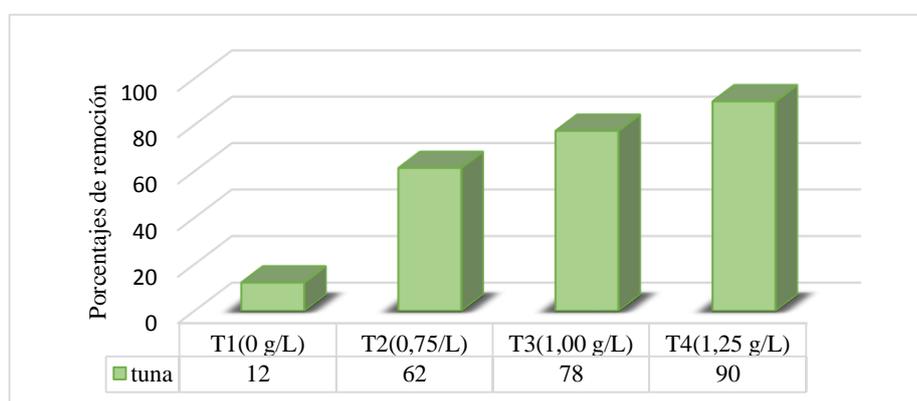


Figura 14. Porcentaje de remoción

Al determinar que existe significancia en el análisis estadístico, es necesario conocer cómo se comportan estas variables en la remoción de turbiedad (clarificación de agua), para ello se usó la prueba de rango múltiple de Duncan.

Tabla 7. Prueba de rango múltiple de Duncan alfa = 0.05

Tratamiento	Media % de remoción	N	Error Estándar	Duncan agrupamiento
T4	90	4	2.5	A
T3	78	4	2.5	B
T2	62	4	2.5	C
T1	12	4	2.5	D

* Medias con la misma letra no son significativamente diferente

Al realizar la prueba de Duncan para la especie de tuna, se observa que con el tratamiento 4, se obtiene el mayor porcentaje de remoción 90 %; seguido del tratamiento 3 y 2 con un porcentaje de remoción de 78 % y 62 %; con el tratamiento 1 se obtienen el menor valor de porcentaje de remoción, esto debido a que se trata del testigo. Esta prueba estadística nos permite demostrar que el tratamiento 4 es el más eficiente y corresponde a la concentración de 1.25 g/L de mucílago deshidratado de tuna, demostrando su poder coagulante en el proceso de clarificación.

4.2.1. Efecto del mucílago del San Pedro

La Tabla 8 muestran los porcentajes de remoción de turbiedad encontrados en cada unidad de análisis al utilizar como clarificador de aguas turbias el mucílago deshidratado de San Pedro.

Tabla 8. Remoción de turbiedad en cada unidad de análisis con el mucílago deshidratado de San Pedro

Especie de cactus	Repeticiones	Porcentajes (%) de remoción de Turbiedad (UNT)			
		T1	T2	T3	T4
		(0 g/L)	(0,75 g/L)	(1.0 g/L)	(1,25 g/L)
San Pedro	1	6	62	74	81
	2	11	55	73	79
	3	10	62	71	76
	4	7	62	71	77
	Suma	34	241	289	313
	Prom.	9	60	72	78

Teniendo en consideración los resultados obtenidos en la Tabla 8, se realizó el análisis de variancia Tabla 9, encontrando que el presente experimento arrojó un coeficiente de variabilidad de 1.14 %, que nos señala las buenas condiciones de conducción del experimento. A continuación y al analizar las diferentes fuentes de variación se observa que:

Se encuentra alta significación estadística para la fuente de variación tratamientos, lo que nos indica que debido a la ausencia de elementos clarificadores del agua, existen respuestas significativas al incorporar al agua las diferentes concentraciones de mucílago del San Pedro, es por lo tanto importante su incorporación en forma racional para asegurar una buena calidad del agua.

Tabla 9. Análisis de varianza para la capacidad de remoción de turbiedad de las especie de San Pedro

Fuentes	SC	GL	CM	Fc	Ft	Significancia
Tratamiento	12111	3	4037.06	643.78	3.49	***
E.E.	75	12	6.27			
Total	12186	15				

CV = 1.14

*** Altamente significativo

Al comprobar que el F calculado (Fc) es mayor al F tabulado (Ft), determinamos que los tratamientos son altamente significativos, demostrando estadísticamente que el mucílago deshidratado de San Pedro es efectivo en la clarificación de aguas turbias. Los resultados se evidencian en la Tabla 10 y Figura 15, que muestran el porcentaje de remoción alcanzado con cada concentración de mucílago deshidratado. Con la concentración de 1.25 g/L se logra 78 % de remoción de turbiedad y con las demás concentraciones el porcentaje de remoción es mayor al 50 %.

Tabla 10. Remoción de turbiedad con la especie de cactus San Pedro

Tratamientos	T1	T2	T3	T4
Concentración de mucílago	0.00 g/L	0.75 g/L	1.00 g/L	1.25 g/L
Porcentaje de remoción	9	60	72	78

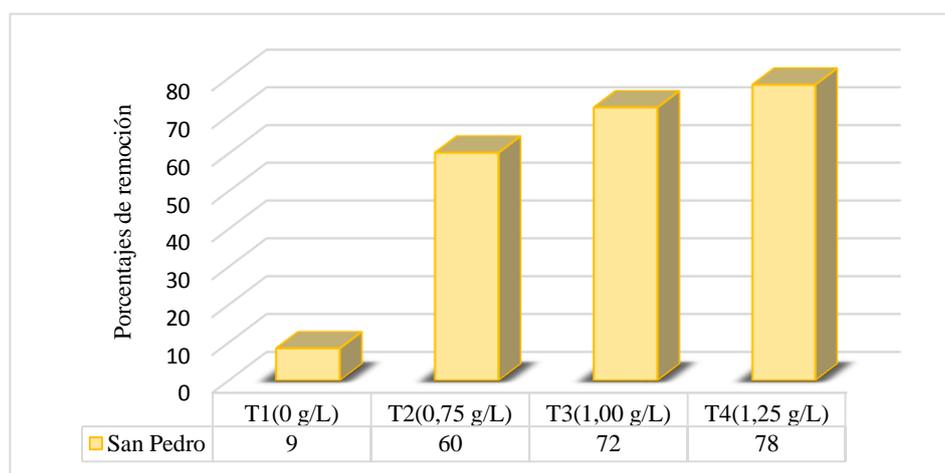


Figura 15. Porcentaje de remoción con la especie San Pedro

Al determinar que existe significancia en el análisis estadístico, es necesario conocer cómo se comportan estas variables en la remoción de turbiedad (clarificación de agua), para ello se usó la prueba de rango múltiple de Duncan.

Tabla 11. Prueba de rango múltiple de Duncan alfa = 0.05

Tratamiento	Media % de remoción	N	Error Estándar	Duncan agrupamiento
T4	78	4	2.5	A
T3	72	4	2.5	B
T2	60	4	2.5	C
T1	9	4	2.5	D

* Medias con la misma letra no son significativamente diferente

Al realizar la prueba de Duncan para la especie de San Pedro en la remoción de turbiedad, se observa que con el tratamiento 4, se obtiene el mayor porcentaje de remoción 78 %; seguido del tratamiento 3 y 2 con un porcentaje de remoción de 72 % y 60 %; con el tratamiento 1 se obtienen el menor valor de porcentaje de remoción. Esta prueba estadística nos permite demostrar que el tratamiento 4 es el más eficiente y corresponde a la concentración de 1.25 g/L de mucílago deshidratado de San Pedro, demostrando su poder coagulante en el proceso de clarificación.

4.2. Comparativo de ambas especies

La Tabla 5 y Tabla 9, demuestran que existe significancia en los tratamientos al evaluar el valor de F ($F_0 > F$ tabulado) para ambas especies; aceptando la hipótesis alterna (las especie con las diferentes concentraciones de mucílago deshidratado tienen efecto similares en la remoción de turbiedad para lograr la clarificación del agua turbia). Este análisis estadístico demuestra que el uso de las concentraciones de mucílago deshidratado de ambas especies son altamente significativas en la remoción de turbiedad para lograr la clarificación de aguas turbias.

La Tabla 12, muestra los resultado de porcentaje de remoción de turbiedad con las concentraciones de mucílago deshidratado de las especies de cactus usados como coagulantes naturales en la investigación.

Tabla 12. Porcentaje de remoción de turbiedad, obtenida del ordenamiento de datos consumados de los tratamientos.

Especies de cactus	Tratamiento	Concentraciones de mucílago (g/L)	Medida inicial (UNT)	Medida final (UNT)	Porcentaje de remoción (%)
tuna	1	0.00	712.8	629	12
	2	0.75		268	62
	3	1.00		158	78
	4	1.25		69	90
San Pedro	5	0.00	781.5	714	9
	6	0.75		310	60
	7	1.00		215	72
	8	1.25		171	78

De las dos especies, la tuna tiene mayor efectividad en la remoción (separación) de elementos sólidos. La concentración más efectiva es 1.25 g/L para ambas especies, logrando remover 90 % de turbiedad con tuna y 78 % con San Pedro, esto demuestra que la tuna, tiene mayor eficiencia en la remoción de turbiedad; Urquía (2017) logra resultados de remoción de turbiedad con la tuna de 97,38% con la misma concentración y con las concentraciones de 0.75 g/L y 1 g/L, logra remover 67.3 % y 76 %. Por otro lado Castillo y Silva (2018) con la concentración de 1.25 g/L logran porcentajes de remoción de 91 %, en turbiedades iniciales de 715 UNT, similar a los resultados

obtenidos. Así mismo Olivero *et al.* (2015) utilizando la tuna en sus muestras con una turbiedad inicial de 276 UNT, logra porcentajes de remoción de 93,25% y 99,80%.

Con el cactus San Pedro se logra un porcentaje de remoción de turbiedad de 78 % con su concentración más efectiva (1.25 g/L), sin embargo antecedentes como Torres (2012), en estudio extraídos con etanol del cactus *Echinopsis pachanoi* presentan porcentaje de remoción de turbidez mayores al 99%.

López (2000) utilizando la tuna, logra obtener porcentajes de remoción de turbidez mayor a 90 %, además, afirma que los coagulantes naturales poseen propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades. Saenz, *et.al* (2004) atribuyen la capacidad de coagulación del *Opuntia ficus-indica*, al ácido galacturónico.

4.3. pH

En la Tabla 13, se puede observar la variación de pH con el uso de las concentraciones de la tuna y San Pedro

Tabla 13. Datos obtenidos de mediciones de pH en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.

Tratamientos	Especies de cactus	Concentraciones de mucílago (g/L)	pH inicial	pH final
1	tuna	0.00	8.12	7.65
2		0.75		6.93
3		1.00		6.83
4		1.25		6.72
5	San Pedro	0.00	8.12	7.9
6		0.75		6.90
7		1.00		6.67
8		1.25		6.19

Con las concentraciones de tuna y San Pedro, se reduce el pH, a mayor concentración mayor es la disminución. Urquia (2017), logra con el uso de concentraciones de mucílago de tuna reducir el pH de 8.04 a 6.95. Estudios, indican, que el pH no ejerce efectos directos en los consumidores, es un parámetro, que indica la calidad del agua. Para que, la desinfección con cloro, sea eficaz, es necesario que el pH, sea inferior a 8 (Metalf

2002). Por otro lado, Torres (2012), afirma que el pH más adecuado para llevar a cabo el proceso de coagulación está entre el rango 6-7, con puntos isoelectricos (pI) entre 4 y 6, debido que a pH superiores las proteínas tienen naturaleza aniónica. El proceso eficaz de coagulación de partículas suspendidas en el agua con cargas positivas, se lleva a cabo a partir del mecanismo de barrido, formando una estructura en forma de red (Torres 2012).

4.4. Sólidos disueltos

En la Tabla 14, nos muestra la variación de los SDT, con el uso de las diversas concentraciones de mucílago deshidratado de la tuna y San Pedro, para la clarificación de agua turbia.

Tabla 14. Datos obtenidos de sólidos disueltos en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.

Tratamientos	Especies de cactus	Concentraciones de mucílago (g/L)	Sólidos disueltos inicial (mg/L)	Sólidos disueltos final (mg/L)
1		0.00		110
2	tuna	0.75	110	31
3		1.00		118
4		1.25		177
5		0.00		122
6	San Pedro	0.75	110	321
7		1.00		374
8		1.25		687

Los sólidos disueltos se incrementan significativamente con cada una de las concentraciones a excepción de la concentración 0.75 g/L de tuna, coincidiendo con Aucay (2019) quien en su investigación con la tuna obtiene resultados donde los SDT se incrementan de 24 a 36%, explicando que el mucílago de la tuna al entrar en contacto con el agua, desprende sus sales minerales ocasionando que dentro del agua tratada se incrementen los resultados de los SDT en las condiciones finales frente a las iniciales, sin embargo no afectan al sabor del agua.

Vásquez (2013), menciona que los SDT (sólidos disueltos totales) son la suma de los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua. Esto incluye cualquier elemento presente en el agua que no sea la molécula de agua pura (H₂O) y sólidos en suspensión. El incremento de los SDT se debe a las sustancias inorgánicas y orgánicas

contenidas, en su estructura de los cactus, así mismo Choque (2018) menciona que el aumento de los SDT se refleja en la DBO que origina los coagulantes naturales San Pedro y la tuna, este hecho se debe a que estos coagulantes presentan mayor contenido de proteínas y sacarosa, las proteínas contienen nitrógeno, de manera que también ejercen una demanda de oxígeno nitrogenada, y que toda la materia orgánica biodegradable contenida en una muestra de agua será oxidada a CO₂ y H₂O por microorganismos que usan el oxígeno molecular.

4.5. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica está relacionada con SDT, si estos se incrementan del mismo modo se incrementará este parámetro, en la Tabla 15, se muestra que la conductividad eléctrica, se incrementan con las concentraciones de ambas especies, es notable en mayor porcentaje con el cactus San Pedro, debido a su alto contenido de polímeros (carbohidratos: galactosa, xilosa, ramnosa, ácido galacturónico, arabinosa) (Saenz *et.al* 2004).

Tabla 15. Datos obtenidos de las mediciones de conductividad eléctrica en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.

Tratamientos	Especies de cactus	Concentraciones de mucílago (g/L)	Conductividad eléctrica inicial (µS/cm)	Conductividad eléctrica final (µS/cm)
1	tuna	0.00	169.5	170
2		0.75		289
3		1.00		503
4		1.25		710
5	San Pedro	0.00	185.75	186
6		0.75		405
7		1.00		763
8		1.25		962

La conductividad eléctrica del agua se incrementa con el uso de las concentraciones de mucílago deshidratado de tuna, el incremento es mayor con la especie San Pedro. La conductividad eléctrica, con la tuna, se incrementa de 169,5 (muestra M₀) hasta 710 y de 185.75 a 962 con el mucílago de San Pedro; esta variación se puede deber a que los cactus en su estructura contiene sustancias químicas (alcoloides) (Kirchmer 1973). La

conductividad eléctrica es directamente proporcional a los valores de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor se incremente los sólidos disueltos mayor será la conductividad eléctrica (Moreno 2017). Recordando el mecanismo de coagulación, las partículas pueden agregarse y establecerse a la solución a través de cuatro mecanismos básicos: la compresión de doble capa, la floculación de barrido, la adsorción y la neutralización de carga, la adsorción y puente interparticular (López 2000). Las sales usualmente se disuelven en agua formando iones, que tienen una carga positiva o negativa, incrementando al mismo tiempo la conductividad eléctrica de los fluidos, la presencia de sales puede causar la compresión de la doble capa, dando como resultado la desestabilización de las partículas por lo que las interacciones electrostáticas repulsivas son superadas por fuerzas atractivas de van der Waals. Campos (2008), estableció que el empleo de coagulante natural en el tratamiento de aguas, eleva de manera significativa los valores de conductividad; los coagulantes naturales contienen polímeros que incrementan ligeramente la carga iónica del agua.

Los resultados de conductividad eléctrica obtenidos con ambas especies, no sobre pasa los valores de 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ establecidos en el Reglamento de la Calidad del Agua para consumo humano, Espinoza (2006), señala que los valores de conductividad en cuerpos de agua superficiales oscilan entre 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Conclusión

Los máximos porcentajes de remoción de turbiedad se logró con la concentración de mucílago deshidratado 1.25 g/L, la tuna obtuvo 90.26 % de remoción y el cactus San Pedro 78.15%; así mismo se concluye que de las dos especies, la tuna es la más eficiente, convirtiéndola en una alternativa para ser utilizadas como coagulante - floculante natural para la clarificación de aguas turbias.

3.2. Recomendación

Se recomienda ir probando la clarificación de las aguas turbias, utilizando otras concentraciones de las especies estudiadas, para alcanzar resultados más confiables y valederos, por ser el agua el elemento más importante en las acciones cotidianas.

Se recomienda ir regulando la temperatura de la estufa para el deshidratado del mucílago de los cactus, hasta alcanzar resultados más exactos de estas especies y así no pierdan propiedades que ayuden a la remoción de la turbidez para la clarificación del agua

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- Alfrey, AC; Legendre GR; Kaehny WD. 1976. El síndrome de encefalopatía de diálisis, una posible intoxicación por aluminio. 184 -188 p.
- Almendárez, N. 2004. Comprobación de la efectividad del coagulante (cochifloc) en aguas del lago de Managua "Piedras Azules". Revista Iberoamericana de Polímeros.
- Amaya, J. 2009. Cultivo de Tuna (*Opuntia Ficus Indica*) (en línea) Gerencia Regional Agraria La Libertad. La Libertad, Trujillo. 18p. Consultado 12 ago. 2018. Disponible en <http://www.agrolalibertad.gob.pe/sites/default/files/MANUAL%20TECNICO%20ODE%20TUNA.pdf>
- Andrade, J; Cavelier, J; Nobel, P. 1992. Mucilage in Cacti: Its Apoplastic Capacitance, Associated Solutes, and Influence on Tissue Water Relations. Journal of Experimental Botany. 43(250): 641-648.
- Aquino, E; Chavarría, Y; Chávez, J; Guzmán, R; Silva, E. 2012. Caracterización fisicoquímica de siete variedades de tuna (*Opuntia* spp.) color rojovioleta y estabilidad del pigmento de las dos variedades con mayor concentración. (en línea). Consultado 12 ago. 2018. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4035433ISSN-e 1665-4412>
- Arboleda, J. 2000. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 ed. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria. Mexico. Mc Graw Hill. 256 p.
- Aucay, MC. 2019. Remoción de la turbiedad y color mediante el uso de tuna (*Opuntia ficus-indica*) en el agua cruda del subsistema de la comunidad de Lunduma, cantón Santa Isabel (en línea). Tesis Ing. Ambiental. Cuenca, Ecuador, UC-FCQ-IA. Consultado 22 sep. 2019. Disponible en <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33350/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf>

- Barrientos, P. 1983. Nopal y agaves como recurso de zonas áridas y semiaridas de México. Chapingo-Mexico: Centro de Genetica.
- Bianchi, A. 1996. Lineamientos farmacológicos y etno-farmacológicos “Despierta, Remedio, cuenta...”: adivinos y médicos del Ande, Tomo I, editado por Mario Polia. Lima: PUCP, pp. 321-325.
- Boisvert, JP. 1998. Adsorción de fosfato en procesos de floculación de sulfato de aluminio y poli-sulfato de silicato de aluminio. Res de agua. 1939-1946 p.
- Bustillos, LGT; Carpinteyro, S; Orozco, C. 2013. Producción y caracterización del mucílago *Opuntia ficus-indica* y su uso como coagulante-floculante para aguas residuales industriales. En t. J. Biotechnol.
- Cabieses, F. 1993. Apuntes de medicina tradicional, lo racional de lo irracional. Lima, Ciselpesa.
- Campos, J; Colina, G; Fernández, N; Ojeda, G; Torres, G. 2003. Caracterización del agente activo de las semillas de *Moringa oleifera*. HPLC. Venezuela, Huaracán.
- Cárdenas, Y. 2000. Tratamiento de Agua-Coagulación y Floculación. Evaluación de plantas y desarrollo Tecnológico, Sedapal, Lima.
- Carranza, J. 2008. Monitoreo Hidrológico de la Calidad del Agua en la Cuenca Amazónica Peruana. Proyecto Hidrogeodinámica de la Cuenca Amazónica (HiBAm). Lima, Perú.
- Castillo Vergara, J; Silva Gil, I. 2018. Efectos del coagulante-floculante de la tuna en la turbidez, DBO5 y sólidos totales del efluente de la Empresa Casa Grande S.A. Tesis Ing. Ambiental, UNT. Trujillo, Perú.
- Castro, LM.; Gibaja OS. 1979. Extracción de polisacáridos de la *Opuntia ficus-indica*, Identificación de algunos de sus componentes y su uso en Tratamientos de aguas. Tesis Ign. Quim. Lima, Perú, UNMSM.
- Choque, D. 2018. Capacidad floculante de coagulantes naturales en el tratamiento de agua (en línea). Artículo Científico Ing. Ambiental. UNJMA, Andahuaylas, Apurímac, Perú.

- CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres). 2013. Propuesta de Enmienda al Apéndice II de la CITES. Chile.
- Cogollo, J. 2010. Clarificación del agua usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclорuro de aluminio. *Dyna*. 78(165): 1827.
- Contreras, K; Mendoza, Y; Salcedo, G; Olivero, R; Mendoza, G. 2015. El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Revista Producción Limpia*. 10(1): 40.50.
- Coto, R. 2011. Estudio preliminar del uso de coagulantes químicos en la coagulación-floculación de aguas residuales Tecnología en Marcha. Tesis. Ecuador, ESPCH. 121p.
- Crapper, S. 1992. Proceso de coagulación. México. Zeta-Meter.
- Espinoza, S. 2006. Estudios de algunas características físicas de hidrocoloides provenientes de semilla de algarrobo y de cladodios de nopal. Tesis Ing. Agr. Santiago, Chile, UCFCFAF. 132 p.
- Galvín MR. 1998. “Jar Test” en el tratamiento de aguas: Una valiosa herramienta (en línea). Tecnología del Agua, Córdoba, Empresa Municipal Aguas de Córdoba. Consultado 20 jul. 2018. Disponible en <http://webcd.usal.es/Web/ETAP/unidades/documen.alu/jartest/jartest.htm>
- Ganjidoust H.1997. Efecto del coagulante sintético y natural en la eliminación de lignina de aguas residuales de pulpa y papel. *Tecnología de la ciencia del agua*. 286-291p.
- Habibi, Y; Mahrouz, M; Vignon, M. 2005. Aislamiento y caracterización estructural de la protopectina de la piel de los frutos de tuna *Opuntia ficus-indica*. *Polímeros de carbohidratos*. 60: 205-213.
- Jadhav MV, Mahajan YS. 2014. Evaluación de viabilidad de coagulantes naturales en eliminación de turbidez y modelado del proceso de coagulación. *Desalin Water Treat* 52: 5812–5821.
- José, A; Flores G. 2000. Estudio Químico del cactus “San Pedro” (*Echinopsis pachanoi* Britton y Rose). Lima – Perú.

- Kirchmer C. 1973. Aspectos Químicos y Físicos de la coagulación del agua. Lima, Perú. 1 – 9 p.
- López, E. 2000. Utilización de productos naturales en la clarificación de aguas para consumo humano. Tesis Ing. Químico. Cuba, UHFIQ. 156p.
- Martínez, S. 2012. Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. México. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Metalf; Eddy. 2002. Ingeniería de aguas residuales. Mc Graw-Hill. V.1, pp.97.
- Miller, S; Fugate, E; Oyanedel, V; Smith, J; Zimmerman, JB. 2008. Hacia la comprensión de la eficacia y el mecanismo de *Opuntia* spp. como coagulante natural para la aplicación potencial en el tratamiento del agua. Reinar. Sci. Technol.,42, 4274-4279.
- Moreno, SC. 2017. Disminución de la turbidez del agua del río Crisnejas en la comunidad de Chuquibamba-Cajabamba utilizando *Opuntia ficus-indica*, *Aloe vera* y *Caesalpinia spinosa* (en línea). Tesis Ing. Ambiental. Trujillo, Perú, UCV. Consultado 10 ago. 2018. Disponible en http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/6854/moreno_ps.pdf?sequence=1
- Nharingo, T; Ngwenya, TJ. 2013. Adsorción simple y binaria de plomo (II) y zinc (II) iones sobre *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) de ceniza. En t. J. Eng. Sci. Innov. Technol. 2, 419e426.
- Nharingo, T; Zivurawa, MT; Guyo, U. 2015. Explorando el uso de Cactus *Opuntia ficus-indica* en la biocoagulación y floculación de iones Pb (II) de aguas residuales. En t. J. Reinar. Sci. Technol.
- Nobel, P; Cavelier, J; Andrade, J. 1992. Mucílago en cactus: su capacidad apoplástica, solutos asociados e influencia en las relaciones de agua y tejido. Revista de Botánica Experimental,43(250), 641-648.
- Ogunbodede, O; McCombs, D; Trout, K; Daly, P; Terry, M. 2010. Nuevas concentraciones de mescalina de 14 taxa / cultivares de *Echinopsis* spp. (Cactaceae)

("San Pedro") y su relevancia para la práctica chamánica. Revista de Etnofarmacología.131: 356 – 362.

OMS (Organización Mundial de la Salud). 2012. Agua, saneamiento y salud (ASS): Informe acerca de los progresos sobre el agua potable y saneamiento. (en línea). Consultado 21 mar. 2017. Disponible en http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2012/drinking_water_20120306/es

Osorno, H. 2009. Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Tesis Ing. de Min. Medellín, UNM.

Ostolaza, C. 1995. El Periodo Formativo. En *Quepo*. Vol. 9. Lima. pp. 73-82. 40.

Ostolaza, C. 2014. Todos los cactus del Perú. Ministerio del Ambiente MINAM. (en línea). Franco EIRL. Lima. 541p. Consultado 10 ago. 2018. Disponible en <http://www.minam.gob.pe/diversidadbiologica/wpcontent/uploads/sites/21/2014/02/document.pdf>

Pérez, L. 2005. Teoría de la sedimentación. Área de hidráulica, Cátedra de Hidráulica Aplicada a la Ingeniería Sanitaria. Disponible en <http://pilagacierrejulio2014.fi.uba.ar/escuelas/iis/Sedimentacion.pdf>

Quispe Jiménez, H. 2012. Aplicación del mucílago extraído de nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la clarificación del agua del río Uchusuma. Tesis Ing. Quím. Tacna, Perú, UNJB.

Reti, L; Castrillón, J. 1951. Alcaloides de cactus. *Trichocereus terscheckii* (Parmentier) Britton y Rose. Revista de la American Chemical Society 73 (4): 1767 – 1769.

Rodriguez, A; Cantwell, M. 1988. Cambios en el desarrollo de la composición y calidad de los cladodios de nopalitas. Alimentos de plantas Hum Nutr.38(1): 83-93.

Rodriguez, S; Muñoz, R; García , O; Fernández, E. 2005. Empleo de un producto coagulante Natural para clarificar Agua. Revista CENIC Ciencias Químicas, 36.

Romero Rojas, J. 2002. Calidad del agua. Nva. ed. Colombia. S.A. 253p.

- Ruales, J; Zumba, J. 1998. Cuantificación y caracterización de fibra dietética en frutas y hortalizas ecuatorianas. Temas en Tecnología de Alimentos. Fibra Dietética. Dirección de Publicaciones y materiales educativos, Instituto Politécnico Nacional. Mexico. F. CYTED. 2: 55-59.
- Sáenz, C. 2004. Compuestos funcionales y alimentos derivados de *Opuntia* spp. El Nopal: Tópicos de Actualidad. Esparza, G; Valdez, R; Méndez S (eds.). Universidad Autónoma de Chapingo, México. p.211-222.
- Silva, MN. 2017. Extracción del mucílago de la penca de tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias (en línea). Tesis Ing. Quím. Lima, Perú, UNMSM. 171p. Consultado 10 ago. 2018. Disponible en http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/7155/Silva_cm.pdf?sequence=1
- Torres, F. 2012. Análisis comparativo del proceso de floculación-coagulación en la potabilización de agua de río, usando como fuente de captación el Río Daule y el Río Babahoyo en la Provincia del Guayas. Tesis de grado. ICQA, ESPOL. Guayaquil, Ecuador.
- Trachtenberg, S; Mayer, AM. 1981. Composition and properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. Phytochemistry, 266-268 p. (en línea). Consultado 18 de may. 2018. Disponible en http://www.japsonline.com/admin/php/uploads/541_pdf.pdf.
- Urquía CK. 2017. Eficiencia de la *Opuntia Ficus-Indica* frente a la Moringa Oleífera, en el tratamiento de aguas del Río Huaycoloro, SJL. Tesis Ing. Ambiental. UCV. Lima, Perú.
- Vargas, L; Ramos, E. (2003). Un método simple de extracción de mucílago en nopal verdura. I Congreso de Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Chapingo. Mexico.
- Vázquez, D. 2003. Estudio de Factibilidad para la Construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en la UDLA-P. Puebla, México.

Villegas, M. 1997. Los Nopales (*Opuntia* spp.) recursos y símbolos tradicionales en México. In: Memorias. VII Congreso Nacional y V Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México. 271-273 p.

ANEXOS

Tabla 16. Ordenamiento de datos por consumación de tratamientos y repeticiones y sus promedios para turbiedad.

Especies de cactus	Tratamiento	Turbiedad (UNT)			
		c ₀ (0g/L)	c ₁ (0.75g/L)	c ₂ (1 g/L)	c ₃ (1.25 g/L)
tuna	1	766	294	158	68
	2	806	202	169	73
	3	650	290	155	68
	4	629	288	152	68
PROMEDIO		713	269	158	69
San Pedro	5	886	336	230	172
	6	797	358	212	171
	7	714	272	207	170
	8	729	276	210	170
PROMEDIO		782	311	215	171

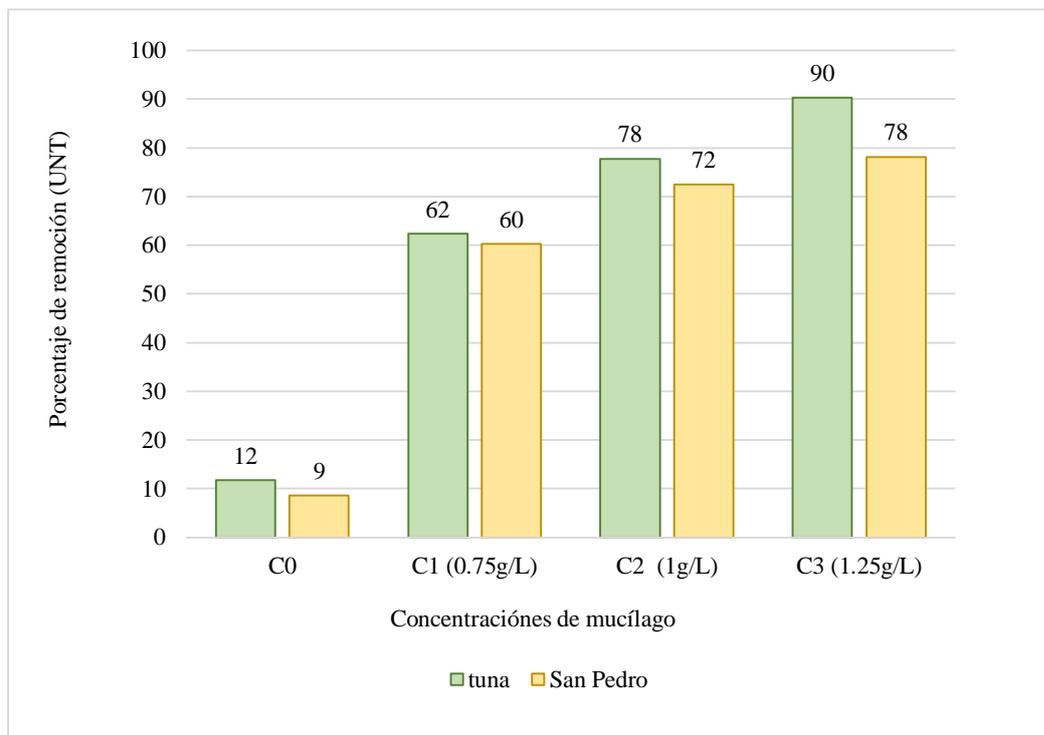


Figura 16. Remoción de turbiedad lograda en cada unidad experimental

Tabla 17. Datos obtenidos de mediciones de pH en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.

Especies de cactus	Tratamiento	pH			
		c ₀ (0g/L)	c ₁ (0.75g/L)	c ₂ (1 g/L)	c ₃ (1.25 g/L)
tuna	1	7.60	6.89	6.79	6.69
	2	7.70	6.96	6.81	6.78
	3	7.66	6.97	6.89	6.67
	4	7.63	6.91	6.83	6.73
	PROMEDIO	7.65	6.93	6.83	6.72
San Pedro	5	7.90	6.92	6.73	6.18
	6	7.89	6.95	6.70	6.21
	7	7.80	6.93	6.72	6.14
	8	7.86	6.90	6.52	6.22
	PROMEDIO	7.9	6.90	6.67	6.19

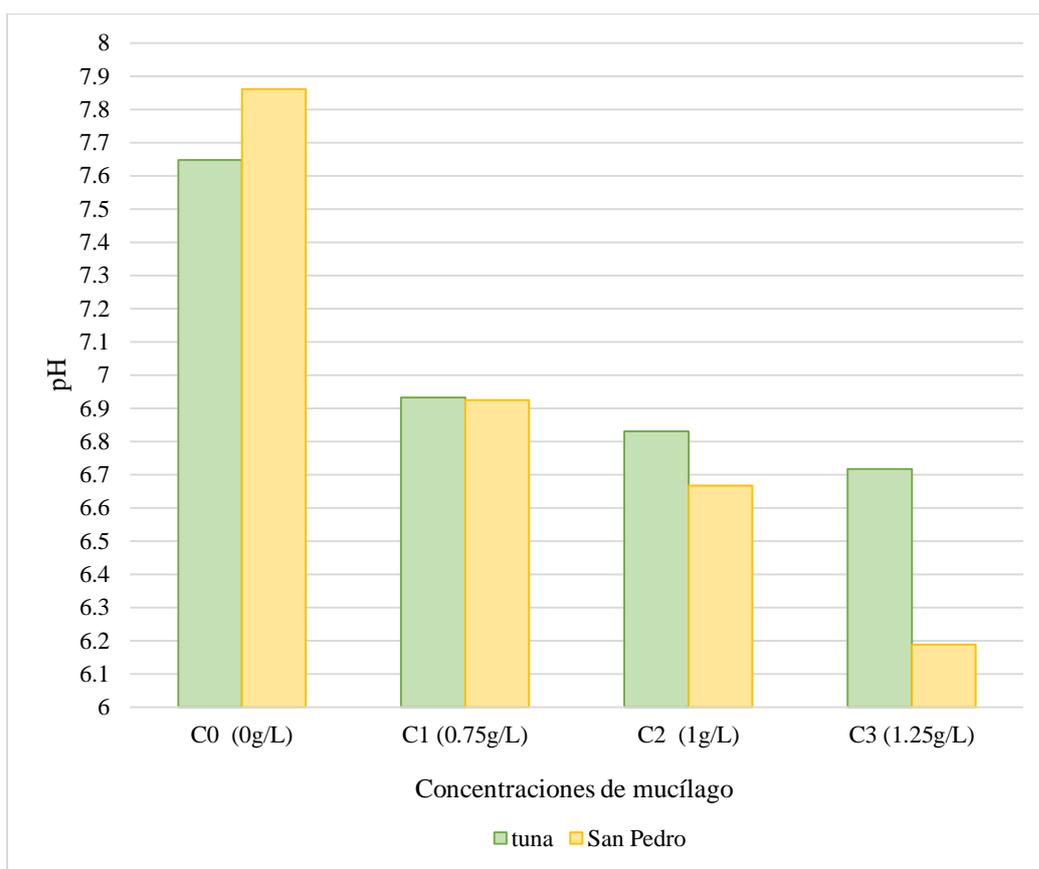


Figura 17. Medición del pH, usando las diferentes concentraciones de mucílago deshidratado

Tabla 18. Datos obtenidos de sólidos disueltos en las unidades experimentales tratadas con las diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro.

Especies de cactus	Tratamiento	Sólidos disueltos (mg/L)			
		c ₀ (0g/L)	c ₁ (0.75g/L)	c ₂ (1 g/L)	c ₃ (1.25 g/L)
tuna	1	112	32	118	174
	2	104	26	116	163
	3	109	27	114	182
	4	115	38	122	190
	PROMEDIO	110	31	118	177
San Pedro	5	119	322	365	687
	6	118	328	372	590
	7	122	315	382	726
	8	128	318	379	746
	PROMEDIO	122	321	374	687

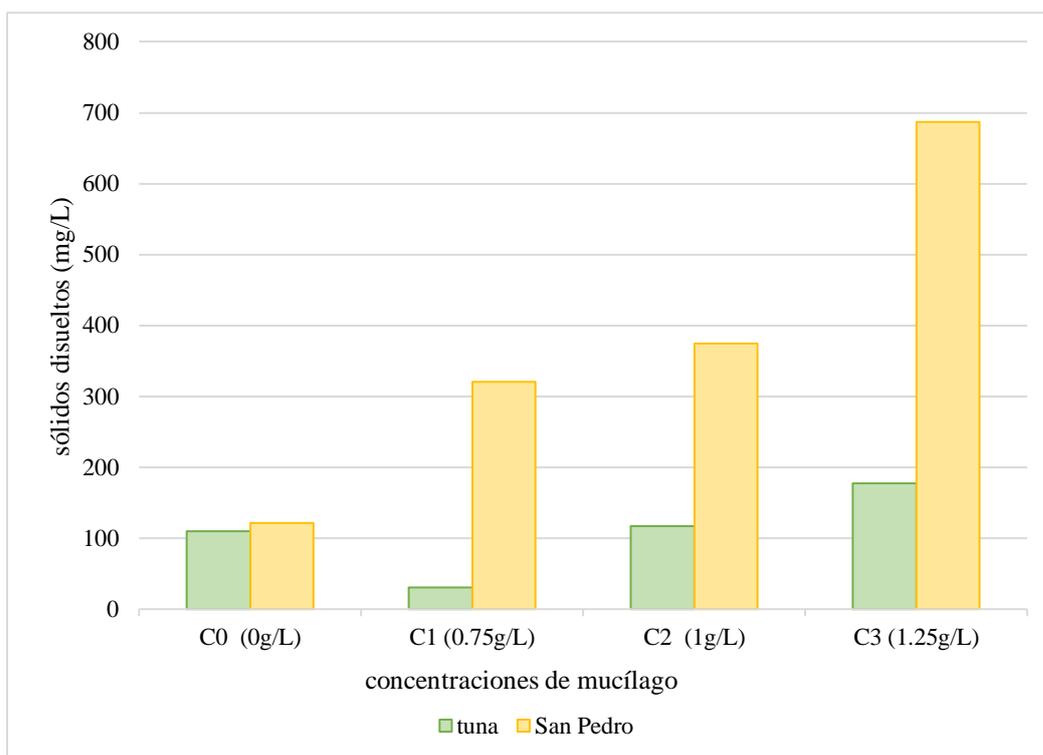


Figura 18. Comportamiento de los niveles de mucílago en cada una de las dos especies estudiadas para sólidos disueltos

Tabla 19. Datos obtenidos de las mediciones de conductividad eléctrica en las unidades experimentales tratadas con diferentes concentraciones de mucílago de tuna y San Pedro

Especies de cactus	Tratamientos	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			
		c_0 (0g/L)	c_1 (0.75g/L)	c_2 (1 g/L)	c_3 (1.25 g/L)
tuna	1	168	253	520	722
	2	172	381	492	698
	3	165	260	487	707
	4	173	263	512	715
	PROMEDIO	170	289	503	710
San Pedro	5	178	389	766	952
	6	185	398	761	959
	7	191	426	773	962
	8	189	408	751	976
	PROMEDIO	186	405	763	962

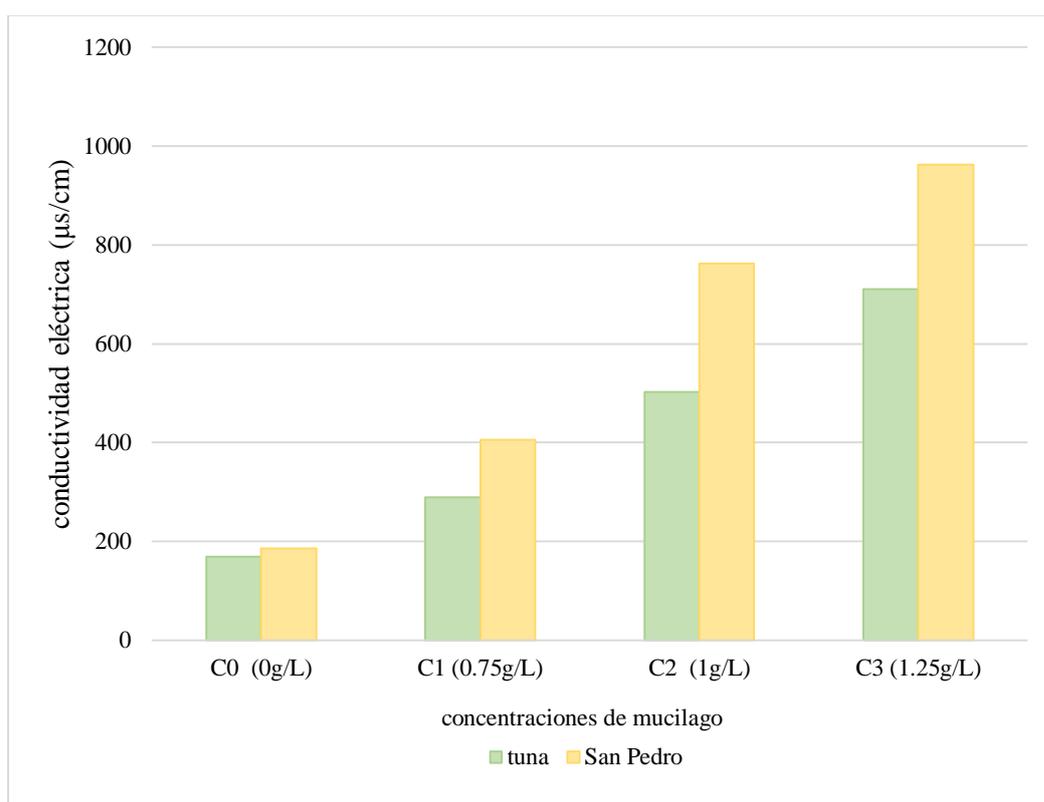


Figura 19. Análisis de varianza para el indicador de conductividad eléctrica

Estructura de los alcaloides presentes en el “San Pedro” (*E. pachanoi*)

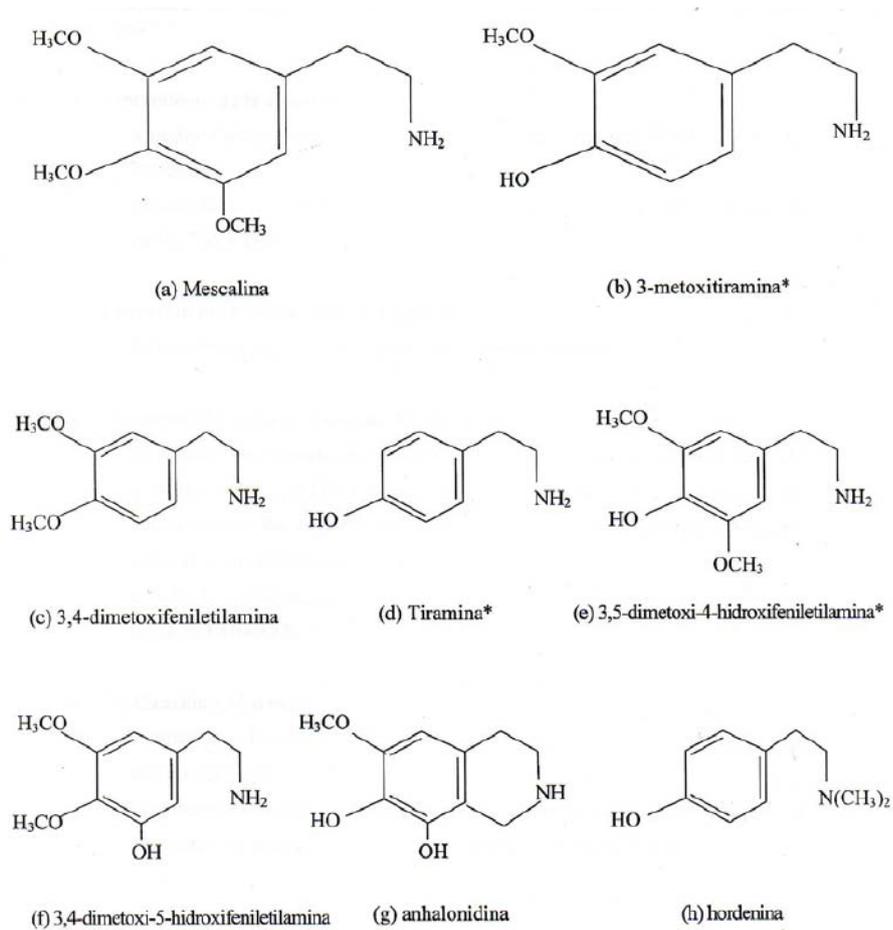


Figura 20. Alcaloides presentes en el San Pedro

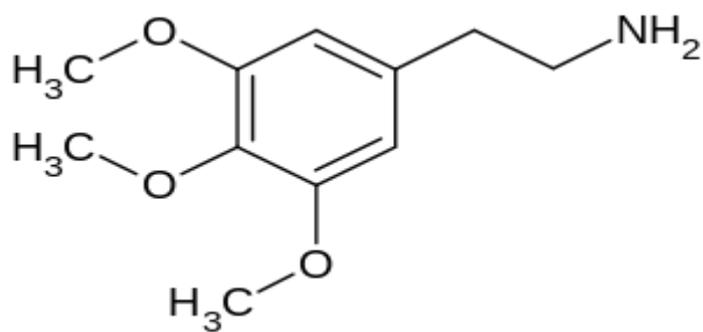


Figura 21. Estructura de los alcaloides presentes en el San Pedro

Determinación de la cantidad de agua evaporada en cada uno de los mucílagos

Tabla 20. Datos obtenidos antes y después de realizar el proceso de secado del mucílago

Especie de cactus	Peso de placa	Placa más mucílago en fresco	Placa más mucílago seco	Porcentaje de Agua en la muestra (%)	Mucílago (g)	TOTAL, de mucílago obtenido (g)
tuna	54.1616	134.0291	56.9174	57.53	2.7558	21.0375
	51.1756	131.222	53.5908	59.16	2.4152	
	63.0456	147.235	66.1265	55.09	3.0809	
	54.2356	132.0625	56.6799	57.08	2.4443	
	49.577	124.0291	52.1859	57.92	2.6089	
	41.2386	121.2324	43.5748	64.06	2.3362	
	43.3327	123.2454	45.7819	62.85	2.4492	
	49.6658	130.2526	52.6128	59.61	2.947	
San Pedro	41.1251	140.2521	43.4952	68.99	2.3701	19.9938
	45.2156	141.3251	48.1661	65.92	2.9505	
	44.0651	123.5462	46.2944	62.53	2.2293	
	42.8745	130.0201	45.6689	64.88	2.7944	
	38.9621	141.2653	41.5656	70.58	2.6035	
	46.9253	172.0639	49.9174	70.99	2.9921	
	47.5623	152.0639	49.6237	67.37	2.0614	
	25.7003	69.0454	26.6308	61.43	0.9305	
25.9276	69.5181	26.9896	61.18	1.062		

7.1. Panel fotográfico del proceso seguido para la obtención del mucílago de cada una de las especies usadas para el proceso experimental del trabajo de investigación



Figura 22. Obtención y pesado del mucílago en fresco de San Pedro

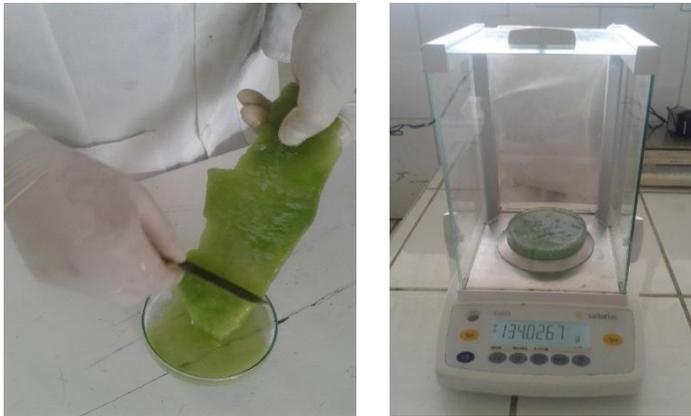


Figura 23. Obtención y pesado del mucílago en fresco de tuna

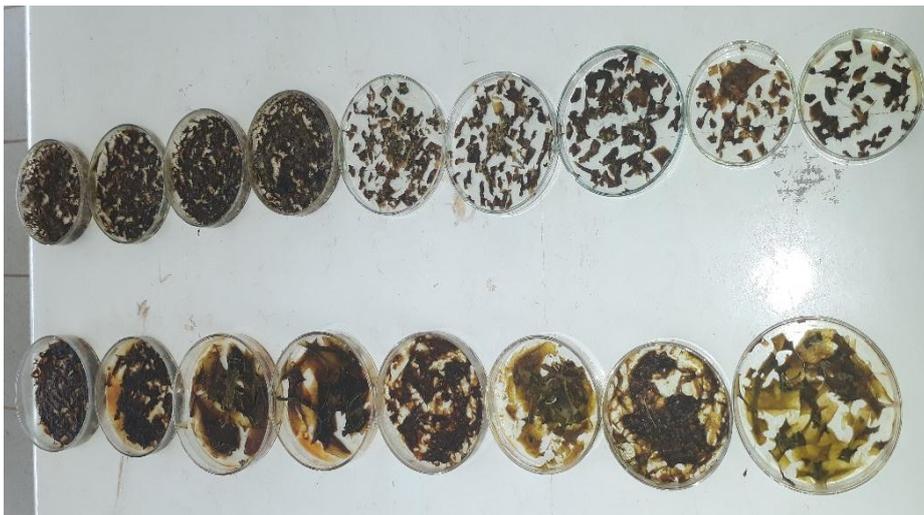


Figura 24. Muestras del mucílago en seco de tuna y San Pedro.



Figura 25. Molienda del mucílago para la preparación de la solución, para realizar los diferentes tratamientos



Figura 26. Proceso de clarificación usando las diferentes soluciones de mucílago de tuna.

7.2. Panel fotográfico: instrumentos utilizados para medir parámetros de campo



Figura 27 . Turbidímetro utilizado para medir la turbiedad de las muestras tratadas con los cactus tuna y San Pedro.



Figura 28. Equipo utilizado para determinar sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica, temperatura, pH de cada muestra tratada

7.3. Reglamento de la calidad del agua para consumo humano D.S. N° 031-2010-SA



Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano

DS N° 031-2010-SA.

Dirección General de Salud Ambiental
Ministerio de Salud
Lima – Perú
2011

ANEXO II LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PARÁMETROS DE CALIDAD ORGANOLEPTICA

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Olor	—	Acceptable
2. Sabor	—	Acceptable
3. Color	UCV escala Pt/Co	15
4. Turbiedad	UNT	5
5. pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6. Conductividad (25°C)	µmho/cm	1 500
7. Sólidos totales disueltos	mg/L	1 000
8. Cloruros	mg Cl ⁻ L ⁻¹	250
9. Sulfatos	mg SO ₄ ⁼ L ⁻¹	250
10. Dureza total	mg CaCO ₃ L ⁻¹	500
11. Amoníaco	mg N L ⁻¹	1,5
12. Hierro	mg Fe L ⁻¹	0,3
13. Manganeso	mg Mn L ⁻¹	0,4
14. Aluminio	mg Al L ⁻¹	0,2
15. Cobre	mg Cu L ⁻¹	2,0
16. Zinc	mg Zn L ⁻¹	3,0
17. Sodio	mg Na L ⁻¹	200

UCV = Unidad de color verdadero
UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

GLOSARIO

Turbiedad o turbidez: medida del grado de transparencia que pierde el agua o algún otro líquido incoloro por la presencia de partículas en suspensión. Cuanto mayor sea la cantidad de sólidos suspendidos en el líquido, mayor será el grado de turbidez.

Mucílago: sustancia vegetal viscosa, coagulable al alcohol. También es una solución acuosa espesa de una goma o dextrina utilizada para suspender sustancias insolubles y para aumentar la viscosidad.

SDT (sólidos disueltos totales): son la suma de los minerales, sales, metales, cationes o aniones disueltos en el agua. Esto incluye cualquier elemento presente en el agua que no sea (H₂O) molécula de agua pura y sólidos en suspensión.

Partes por millón (ppm): es la relación peso-a-peso de cualquier ion al agua.

pH: es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones. La sigla significa potencial de hidrógeno o potencial de hidrogeniones.

Conductividad eléctrica: es la medida de la capacidad de un material o sustancia para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él. La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material.

Remoción: acción y efecto de remover o removerse, se utiliza para hacer referencia a todo aquel acto que tenga ver con quitar algo de su lugar.

Dilución: es la reducción de la concentración de una sustancia química en una disolución. Consiste en rebajar la cantidad de soluto por unidad de volumen de disolución. Se logra adicionando más diluyente a la misma cantidad de soluto: se toma una poca porción de una solución alícuota y después esta misma se introduce en más disolvente.

Clarificación: técnica culinaria mediante la cual un caldo de aspecto turbio y oscuro se logra estabilizar en un aspecto más claro y cristalino.

Mezcalina o mescalina: es un alcaloide del grupo de las feniletilaminas con propiedades alucinógenas.

Propiedades organolépticas: son todas aquellas descripciones de las características físicas que tiene la materia en general, según las pueden percibir los sentidos, como por ejemplo su sabor, textura, olor, color o temperatura.

Coagulación: es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante el cual, neutralizando sus cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí.

Floculación: es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas servidas domésticas, industriales y de la minería.

Sedimentación: proceso de sedimentación está gobernado por la ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuanto mayor es su diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuanto menor es la viscosidad del mismo. Por ello, cuando se quiere favorecer la sedimentación se trata de aumentar el diámetro de las partículas, haciendo que se agreguen unas a otras, proceso denominado coagulación y floculación.

Cactus: están relacionados con el éxito y el reconocimiento laboral. Los cactus o tunitas se asemejan al ser humano, en su más íntima esencia se cubren de espinas para evitar que los dañen, pero al mismo tiempo en situaciones favorables brindan las más hermosas flores.

Echinopsis pachanoi: llamado comúnmente cactus de San Pedro, es una especie de la familia Cactácea. Se utiliza en la medicina tradicional tanto para uso humano como veterinario y es ampliamente cultivado como planta ornamental.

Opuntia ficus-indica: comúnmente conocida como, entre otros, nopal, higuera (de pala), palera, tuna, chumbera, es una especie de planta arbustiva del género *Opuntia* de la familia de las cactáceas.

Cladodio: Rama (macroblasto) aplastada, con función de hoja. Tallo modificado, aplanado, que tiene la apariencia de una hoja y que la reemplaza en sus funciones, porque las hojas existentes son muy pequeñas o rudimentarias para poder cumplir con sus tareas.

Potencial zeta: Es el potencial eléctrico que existe en el plano de corte de la partícula, con una distancia corta de la superficie. Las partículas coloidales dispersas en una solución están cargadas eléctricamente gracias a sus características iónicas y características de bipolaridad.

Microflóculos: Creación de micropartículas desestabilizadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante (generalmente sales de aluminio o de hierro), el cual, neutralizando sus cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí.

Punto isoelectrico: El punto isoelectrico es el pH al que un polianfólito tiene carga neta cero. El concepto es particularmente interesante en los aminoácidos y también en las proteínas. A este valor de pH, la solubilidad de la sustancia es casi nula.

Floculación ortocinética: Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

Floculación pericinetica: Esta producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.

Energía cinética: es la energía asociada a los cuerpos que se encuentran en movimiento, depende de la masa y de la velocidad del cuerpo.

Coagulación por adsorción: Se presenta cuando el agua presenta una alta concentración de partículas al estado coloidal; cuando el coagulante es adicionado al agua turbia los productos solubles de los coagulantes son absorbidas por los coloides y forman los flóculos en forma casi instantánea.

Coagulación por barrido: Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (presenta baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es pequeña; en este caso las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico.

Gomas: Es una sustancia espesa (viscosa) que se pega muy rápidamente utilizada para suspender sustancias insolubles.