



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**EFICIENCIA DE LA TUNA *Opuntia ficus-indica* COMO
BIOCOAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA
DE ESTERO MEDINA, PARROQUIA BELLAMARÍA,
PROVINCIA EL ORO
TRABAJO EXPERIMENTAL**

Trabajo de titulación presentado como requisito para
la obtención del título de
INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR
RUIZ GUZMÁN GERMÁN ALEXIS

TUTOR
ING. LUIS MOROCHO ROSERO M.Sc.

GUAYAQUIL – ECUADOR

2021



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **MOROCHO ROSERO LUIS**, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de Tutor, certifico que el presente trabajo de titulación: **EFICIENCIA DE LA TUNA *Opuntia ficus-indica* COMO BIOCOAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA DE ESTERO MEDINA, PARROQUIA BELLAMARÍA, PROVINCIA EL ORO**, realizado por el estudiante **RUÍZ GUZMÁN GERMÁN ALEXIS**; con cédula de identidad N° **0704676022** de la carrera INGENIERÍA AMBIENTAL, Unidad Académica Guayaquil, ha sido orientado y revisado durante su ejecución; y cumple con los requisitos técnicos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

MOROCHO ROSERO LUIS

Guayaquil, 30 de junio del 2021



UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Los abajo firmantes, docentes designados por el H. Consejo Directivo como miembros del Tribunal de Sustentación, aprobamos la defensa del trabajo de titulación: **“EFICIENCIA DE LA TUNA *Opuntia ficus-indica* COMO BIOCOAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA DE ESTERO MEDINA, PARROQUIA BELLAMARÍA, PROVINCIA EL ORO”**, realizado por el estudiante **RUÍZ GUZMÁN GERMÁN ALEXIS**, el mismo que cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador.

Atentamente,

Dr. Arcos Ramos Freddy
PRESIDENTE

Ing. Ribadeneira Arguello Wolfio, M.Sc.
EXAMINADOR PRINCIPAL

Ing. Morocho Rosero Luis M.Sc.
EXAMINADOR PRINCIPALIZADO

Guayaquil, 14 de junio del 2021

Dedicatoria

El siguiente trabajo está dedicado principalmente a mis padres, que me han sabido dirigir por el camino del bien, dándome su apoyo en las buenas y en las malas, sabiendo aportar con sus experiencias para que pueda culminar estos años de carrera Universitaria de la mejor manera.

Dedicatoria especial también a mi abuela, que es un pilar muy importante en estos años de mi vida, sabiendo guiarme con sus experiencias y apoyándome de la mejor manera.

Se la dedico también a mis hermanos y mis amigos los cuales me aconsejaron durante toda la carrera universitaria, siempre incentivándome para que me entregue al máximo en los estudios y poder culminar con la carrera.

Agradecimiento

Agradezco a Dios, por forjar mi camino y siempre guiarme por el bien, haciéndome tomar las decisiones correctas para poder culminar la carrera de la mejor manera, ayudándome a ser una persona centrada y comprometida en mis estudios. A mis padres Germán Ruíz y Yenny Guzmán por haberme aconsejado en todo momento y brindar su apoyo, experiencia durante todos estos años. Son el motor principal que me impulsa a ser mejor persona todos los días.

A mis hermanos, mi abuela Edda Lozano Cindy Jaén por ser incondicionales y estar presentes en cada etapa de mi vida, saber apoyarme en los momentos difíciles y siempre estar junto a mí.

Gracias a la vida por este triunfo y a todas las personas que supieron apoyarme de alguna u otra manera, para alcanzar este logro en mi vida.

Autorización de Autoría Intelectual

Yo **GERMÁN ALEXIS RUÍZ GUZMÁN**, en calidad de autor del proyecto realizado, sobre **“EFICIENCIA DE LA TUNA *Opuntia ficus-indica* COMO BIOCOAGULANTE PARA LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA DE ESTERO MEDINA, PARROQUIA BELLAMARÍA, PROVINCIA EL ORO”** para optar el título de **INGENIERO AMBIENTAL**, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contienen esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me correspondan, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8; 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Guayaquil, 30 de junio del 2021

RUÍZ GUZMÁN GERMÁN ALEXIS
C.I. 0704676022

Índice general

Portada	1
APROBACIÓN DEL TUTOR	2
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	3
Agradecimiento	5
Autorización de Autoría Intelectual.....	6
Índice general.....	7
Índice de tablas	10
Índice de figuras.....	11
Resumen.....	13
Abstract.....	14
1. Introducción.....	15
1.1 Antecedentes del problema.....	15
1.2 Planteamiento y formulación del problema	18
1.2.1 Planteamiento del problema.....	18
1.2.2 Formulación del problema.....	20
1.3 Justificación de la investigación	20
1.4 Delimitación de la investigación	21
1.5 Objetivo general	22
1.6 Objetivos específicos	22
1.7 Hipótesis	22
2. Marco teórico	23
2.1 Estado del arte	23
2.2 Bases teóricas.....	32
2.2.1 El proceso de potabilización del agua.....	32

2.2.2	Parámetros de calidad del agua.....	33
2.2.3	Coagulación-floculación	35
2.2.4	Tipo de coagulantes.....	37
2.2.5	<i>Opuntia ficus-indica</i>	38
2.2.5.1	<i>Distribución en el Ecuador</i>	42
2.2.5.2	<i>Posibles mecanismos de coagulación</i>	42
2.3	Marco legal.....	43
2.3.1	Constitución de la República del Ecuador.....	43
2.3.2	Reglamentado en el Acuerdo Ministerial 028.....	45
2.3.3	Acuerdo Ministerial 097-A	45
3.	Materiales y métodos	47
3.1	Enfoque de la investigación	47
3.1.1	Tipo de investigación.....	47
3.1.2	Diseño de investigación	47
3.2	Metodología	48
3.2.1	Variables	48
3.2.1.1	<i>Variable independiente</i>	48
3.2.1.2	<i>Variable dependiente</i>	48
3.2.2	Tratamientos	48
3.2.3	Diseño experimental	50
3.2.4	Recolección de datos.....	50
3.2.4.1	<i>Recursos</i>	50
3.2.4.2	<i>Métodos y técnicas</i>	51
3.2.5	Análisis estadístico.....	53
4.	Resultados	54

4.1 Caracterización de pH, turbidez inicial y SST de las aguas del Estero Medina mediante ensayos de laboratorio.	54
4.2 Comportamiento de la turbidez y el pH en las aguas del Estero Medina tratadas con el mucílago del biocoagulante <i>Opuntia ficus-indica</i> en forma fresca y desecada mediante análisis estadístico.	56
4.3 Parámetros fisicoquímicos en las aguas del Estero Medina tratadas con <i>Opuntia ficus-indica</i> mediante la comparación con las normas de calidad de agua vigentes.	65
5. Discusión.....	73
6. Conclusiones.....	77
7. Recomendaciones.....	79
8. Bibliografía	80
9. Anexos	93

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de los tratamientos de acuerdo a los tipos de aguas	33
Tabla 2. Criterios de calidad de aguas para consumo humano y doméstico ...	34
Tabla 3. Clasificación botánica de <i>Opuntia ficus-indica</i>	40
Tabla 4. Características químicas de cladodios de <i>Opuntia ficus-indica</i>	41
Tabla 5. Distribución de los tratamientos	49
Tabla 6. Fuentes de variación y demás componentes de análisis de varianza (ANOVA)	53
Tabla 7. Análisis de varianza (ANOVA)	58
Tabla 8. Orden de importancia de las interacciones binarias.....	62
Tabla 9. Porcentajes de remoción de turbidez una vez culminado el tratamiento.	66
Tabla 10. Procedimiento realizado a cada una de las dosis con su orden respectivo.....	103
Tabla 11. Supuesto de homogeneidad.	96

Índice de figuras

Figura 1. Valores de pH en muestras de agua del Estero Medina	54
Figura 2. Valores de turbidez en muestras de agua del Estero Medina.....	55
Figura 3. Valores de sólidos suspendidos totales en muestras de agua del Estero Medina	55
Figura 4. Prueba de normalidad obtenida mediante el software Minitab 19.....	56
Figura 5. Prueba de Normalidad Kolmogorov-Smirnov obtenida mediante el software Minitab 19	57
Figura 6. Prueba de homocedasticidad mediante el software Minitab 19	58
Figura 7. Gráfica normal de efectos estandarizados (la respuesta es Turbidez final $\alpha = 0,05$), mediante el software Minitab 19	59
Figura 8. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (la respuesta es Turbidez final $\alpha = 0,05$), mediante el software Minitab 19	60
Figura 9. Gráfica de efectos principales para Turbidez final, mediante el software Minitab 19.....	61
Figura 10. Gráfica de interacción para Turbidez final.....	62
Figura 11. Gráfica de cubos para Turbidez final	64
Figura 12. Comportamiento de la turbidez en aguas del Estero Medina tratadas con <i>O. ficus indica</i> a una dosis de 200 mg/L.....	65
Figura 13. Comportamiento de los SST en aguas del Estero Medina tratadas con <i>O. ficus indica</i> a una dosis de 200 mg/L.....	67
Figura 14. Comportamiento de la turbidez en aguas del Estero Medina tratadas con <i>O. ficus indica</i> a una dosis de 50 mg/L.....	68
Figura 15. Comportamiento de los SST en aguas del Estero Medina tratadas con <i>O. ficus indica</i> a una dosis de 50 mg/L.....	69

Figura 16. Comportamiento del pH en aguas del Estero Medina tratadas con <i>O. ficus indica</i> a una dosis de 200 mg/L	70
Figura 17. Comportamiento del pH en aguas del Estero Medina tratadas con <i>O. ficus indica</i> a una dosis de 50 mg/L	71
Figura 18. Cladodios, flores y frutos de <i>Opuntia ficus-indica</i>	93
Figura 19. Especímenes de <i>Opuntia ficus-indica</i> localizados en el Estero Medina, parroquia Bellamaría, cantón Santa Rosa.....	93
Figura 20. Representación del área de muestreo mediante ArcMap.	94
Figura 21. Lugar de muestreo Sitio Estero Medina.	94
Figura 22. Supuesto de normalidad mediante grafica de Minitab.	95
Figura 23. Prueba de Normalidad de Kolmogorov-Smirnov con Minitab.....	95
Figura 24. Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar.	96
Figura 25. Turbidez Final y Dosis Oportuna.....	97
Figura 26. Coeficientes Codificados.....	97
Figura 27. Resumen del modelo.	98
Figura 28. Análisis de Varianza.....	98
Figura 29. Ecuación de regresión en unidades no codificadas.	99
Figura 30. Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes.	99
Figura 31. Estructura de alias	99
Figura 32. Grafica normal de efectos estandarizados.....	100
Figura 33. Gráfica de interacción para turbidez final.....	100
Figura 34. Grafica de efectos principales para Turbidez Final.....	101
Figura 35. Gráfica de interacción para turbidez final.....	101
Figura 36. Gráfica de Cubos.	102

Resumen

Las zonas rurales del Ecuador son las que presentan mayores debilidades en cuanto al suministro de agua de calidad. Uno de estos sectores rurales es el cantón Santa Rosa de la provincia El Oro. En este cantón se encuentra la parroquia rural Bellamaría, la cual cuenta con el Estero Medina como fuente de recursos hídricos. Por ello el objetivo principal fue demostrar la eficiencia de la tuna *Opuntia ficus-indica* como biocoagulante natural para la clarificación del agua en el Estero Medina, parroquia Bella María, provincia de El Oro. Se desarrolló una investigación de tipo experimental y explicativa con un diseño factorial de cuatro factores y dos niveles. Los resultados arrojaron el menor valor de turbidez final (1,705 UNT) con los factores: dosis (200 mg/L), pH (6), método (mucílago fresco) y turbidez (100 UNT). Con la dosis más alta (200 mg/L) del biocoagulante fresco se obtuvo el mayor intervalo de remoción de turbidez (99,18-98,73 %), por lo cual este método fue el más efectivo. Se pudo demostrar la eficiencia de la *O. ficus indica* en la remoción de turbidez de aguas del Estero Medina.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica*, *biocoagulante natural*, *recursos hídricos*, *clarificación*, *turbidez*.

Abstract

The rural areas of Ecuador have the greatest weaknesses in terms of the quality water supply. One of these rural areas the "Santa Rosa" located in the province "El Oro". In this city in located the rural parish is "Bellamaría", which has the Estero Medina as a source of water resources. Therefore, the main objective was to demonstrate the efficiency of the cactus *Opuntia ficus-indica* as a natural biocoagulant for the clarification of water in "Estero Medina", Bella María parish, province of El Oro. An experimental explanatory and research was developed with a factorial design of four factors and two levels. The results showed the lowest final turbidity value (1.705 UNT) with the factors: dose (200 mg/L), pH (6), method (fresh mucilage) and turbidity (100 UNT). With the highest dose (200 mg/L) of fresh biocoagulant, the highest turbidity removal interval was obtained (99.18-98.73 %), therefore this method was the most effective. The efficiency of O. was demonstrated ficus indicates in the removal of turbidity of "Estero Medina" waters.

Keywords: *Opuntia ficus-indica*, biocoagulant natural, hidrics resources, clarification, turbidity.

1. Introducción

1.1 Antecedentes del problema

Las cuencas hídricas son ámbitos geográficos donde convergen los procesos naturales con las actividades de los diversos grupos humanos que habitan en las zonas aledañas. Específicamente, los factores antrópicos actúan ejerciendo una influencia directa sobre la cantidad y calidad de los recursos hídricos; y, en torno a ello, uno de los grandes retos que enfrentará la humanidad en el futuro próximo está vinculado al abastecimiento de agua (Dasso et al., 2014).

El agua está asociada al desarrollo y al nivel de salud de la población. Latinoamérica es una de las regiones en el mundo con abundancia de recursos hídricos en un porcentaje superior al de otros países cuando se contrasta con la tasa poblacional; no obstante, a causa de las deficiencias en cuanto a la prestación de servicios de abastecimiento de agua potable y de saneamiento ambiental, aún persisten zonas con problemáticas que resolver (Fernández, 2018).

De acuerdo a las cifras de la Organización Mundial de la Salud (OMS), 2.100 millones de personas carecían de servicios de agua potable en 2015. Además, las estimaciones realizadas sobre la calidad del agua únicamente están disponibles para el 45% de la población mundial, lo que sugiere niveles de cumplimiento bajos en países en desarrollo (Organización Mundial de la Salud, 2017).

En el Ecuador, el suministro de agua por redes públicas o tuberías durante el período 2007-2016 alcanzó a nivel nacional el 88,7 %, a nivel urbano se ubicó en 95,5 % y a nivel rural fue de 74,3 %. Para el año 2016, en la zona rural solo el 51,4 % cuenta con agua segura y específicamente, los porcentajes en las regiones son de 42,5 % (Amazonía), 68,1 % (Costa) y 75,7 % (Sierra). En cuanto a la calidad del agua, el acceso se ubica en 81,9 % (Sierra), 79,6 % (Costa) y 54,8 % (Amazonía).

Esto demuestra la necesidad que existe de seguir mejorando la prestación del servicio de agua principalmente en la zona rural (Molina-Vera, Pozo, y Serrano, 2018).

El agua que se destina al consumo humano se obtiene a partir de agua cruda proveniente de ríos, manantiales y lagos que debe ser sometida a tratamiento para remover las impurezas, microorganismos y otros componentes producto de la contaminación, los cuales pueden afectar la salud humana. El tratamiento consiste en someter el agua a un proceso de potabilización a fin de hacerla apta para el consumo humano, el cual comprende las fases de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Las tres primeras fases permiten lograr la clarificación (Olivero, Mercado, y Montes, 2013)

El principal parámetro que se considera en la clarificación es la turbidez, la cual se puede remover mediante la adición de productos denominados coagulantes. Comúnmente se utilizan sustancias químicas como sulfato de aluminio, cloruro férrico, carbonato de calcio y otros polímeros orgánicos de tipo sintéticos, que desestabilizan las partículas en suspensión rompiendo las fuerzas que las mantienen separadas (Coagulación). Luego, estas partículas comienzan a aglutinarse dando origen a agregados de mayor tamaño y densidad denominados flóculos (Floculación), los cuales sedimentan fácilmente para facilitar su remoción (sedimentación). La culminación de esta tercera fase permite obtener un agua con menor turbidez que al filtrarla y aplicarle la desinfección requerida, podrá ser consumida por los seres humanos (Meza-Leones, Riaños-Donado, Mercado-Martínez, Olivero-Verbel, y Jurado-Eraso, 2018).

Si bien, los coagulantes de origen químico son muy eficientes para la remoción de turbidez, de bajo costo y alta disponibilidad en el mercado, estos pueden

acarrear una serie de efectos poco amigables con el ambiente y con el ser humano, como son: alta producción de lodos, cambios de pH y alcalinidad, efectos neuropatológicos al relacionarse con el aluminio residual del sulfato de aluminio (coagulante de preferencia) con diversas patologías como el mal de Alzheimer (Exley, 2017) y vincularlo a varios tipos de cáncer (Rodiño-Arguello, Feria-Díaz, Paternina-Urbe, y Marrugo-Negrete, 2015). De allí que surja el interés por investigar coagulantes alternativos de origen natural que tengan una eficiencia similar y no generen efectos indeseados al ambiente o a la salud humana (Camacho-Oviedo, Campos-Núñez, Mercado-Martínez, Cubillán-Acosta, y Castellar-Ortega, 2020).

Los coagulantes naturales pueden obtenerse a partir de materiales de origen vegetal o animal que tienen un comportamiento parecido a los de tipo químico, pues son capaces de reducir la turbidez y el color, incluso algunos poseen propiedades antimicrobianas. Aparte de lo señalado, son ambientalmente amigables y su eficiencia en la remoción de los parámetros mencionados igualan o superan a los de origen químico (Ramírez y Jaramillo, 2015).

Entre los coagulantes de origen vegetal reportados recientemente en investigaciones, se encuentran: *Moringa oleífera* (Meza-Leones, Riaños-Donado, Mercado-Martínez, Olivero-Verbel, y Jurado-Eraso, 2018; Oliveira, Pinheiro, De Oliveira, Cordeiro, & Neves, 2018), cactáceas (Olivero, Mercado, y Montes, 2013), papa (Camacho-Oviedo, Campos-Núñez, Mercado-Martínez, Cubillán-Acosta, y Castellar-Ortega, 2020), papaya (Díaz, 2019) y banano (Sierra-Julio, Navarro-Silva, Mercado-Martínez, Flórez-Vergara, y Jurado-Eraso, 2019), entre otras.

También se han estudiado coagulantes de origen animal, entre los que figuran la quitina (Fuentes, Mendoza, Chávez, Cedeño, y Ortiz, 2017), el quitosano (Oña &

Venegas, 2020) y la gelatina de huesos (Briceño, Fuentes, Mendoza, Bolaños, y Caldera, 2014).

En función de lo expuesto, los coagulantes de origen natural pueden constituir una alternativa viable para el tratamiento de aguas en las zonas que carezcan del servicio de agua potable en el Ecuador.

1.2 Planteamiento y formulación del problema

1.2.1 Planteamiento del problema

Una de las principales problemáticas de los países en desarrollo es la muerte de menores de cinco años a causa de diarreas agudas, tanto es así, que se ubica como la segunda causa de muerte. Entre los tratamientos preventivos eficaces frente a esta problemática están: el lavado de manos con agua y jabón, el mejoramiento de la calidad del agua, y el mejoramiento de las condiciones sanitarias (Molina-Vera, Pozo, & Serrano, 2018).

Al respecto, las zonas rurales del Ecuador son las que presentan mayores debilidades en cuanto al suministro de agua de calidad, por lo cual se hace necesario hallar alternativas rápidas y viables para prevenir las enfermedades hídricas en las provincias o cantones que no cuentan con servicio de agua potable. Uno de los cantones que tiene sectores rurales con problemas en el suministro de agua potable, es el cantón Santa Rosa de la provincia El Oro, con una población de 71.818 habitantes en el año 2010 y proyectada a 82171 para el año 2020 (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2020).

Particularmente, en el cantón mencionado se encuentra la parroquia rural Bellamaría, la cual cuenta con el Estero Medina como fuente de recursos hídricos. Esta parroquia, para el año 2010 tenía una población de 2322 habitantes y está proyectada para el 2020 en 2949 habitantes. La misma se caracteriza por el

desarrollo de actividades agropecuarias, con énfasis en el cultivo de diversas especies de frutales, así como la producción avícola y ganadería, tanto vacuna como porcina. Este tipo de actividades antrópicas ha generado la intervención desordenada del territorio y están ocasionando una alta contaminación de los recursos hídricos por las descargas de aguas servidas directa o indirectamente a los afluentes de agua (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Bellamaría Cantón Santa Rosa, 2015)

En general, el agua para consumo en la parroquia Bellamaría es filtrada y clorada, pero su calidad es media y repercute directamente en la salud de la población. De hecho, en el barrio Valle Hermoso se registran numerosos casos de pacientes con enfermedades diarreicas agudas, lo cual está íntimamente relacionado al agua que se consume, debido a que el agua cruda es de deficiente calidad, tiene alta presencia de coliformes fecales en la mayoría de los sistemas de agua, no se aplican métodos adecuados para su tratamiento y algunos pobladores la consumen directamente. No obstante, la parroquia Bellamaría cuenta con suficientes recursos hídricos para satisfacer la demanda poblacional, pero se requiere el tratamiento del agua en sistemas comunes a fin de que cumpla con los estándares de calidad establecidos en las normativas vigentes. Es por ello que uno de los objetivos señalados en los planes de gestión parroquial es proveer el servicio básico de calidad del agua mediante la implementación de sistemas sostenibles (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Bellamaría Cantón Santa Rosa, 2015).

Una de las alternativas para realizar el tratamiento del agua en este poblado rural mientras se ejecutan las obras planificadas, es el uso de coagulantes naturales que ayuden a la clarificación del agua, previo al proceso de filtración y desinfección, a

fin de que estas dos últimas fases resulten más eficientes. Dado que, entre las especies vegetales que predominan en la parroquia Bellamaría se encuentra la cactácea *Opuntia ficus indica* que ha sido investigada en Ecuador para el tratamiento de las aguas del río Bulubulu de la provincia del Guayas (Atupaña & Guacho, 2019) y en otros países (Miñano, y otros, 2012), demostrando ser eficiente en la remoción de turbidez y color del agua; se consideró importante estudiar la eficiencia de esta especie para la clarificación del agua del Estero Medina en la parroquia Bellamaría.

1.2.2 Formulación del problema

¿Cuál es la eficiencia de la tuna *Opuntia ficus-indica* como biocoagulante para la clarificación del agua en el estero Medina, parroquia Bella María, provincia de El Oro?

1.3 Justificación de la investigación

Este estudio permitirá profundizar sobre los biocoagulantes, especialmente el que se obtendrá a partir de la cactácea *Opuntia ficus indica*, el cual se considera muy efectivo en aguas con valores bajos de turbidez, pero en el caso presente se aplicará en aguas con valores iniciales de turbidez altos, como los que posiblemente se registran en las aguas del Estero Medina. Las deducciones que se realicen contribuirían al enriquecimiento del cuerpo teórico existente en cuanto a la evaluación de biocoagulantes en el Ecuador.

Por otra parte, los resultados que se deriven de la investigación con el biocoagulante *Opuntia ficus-indica*, servirán a los habitantes de la parroquia Santa Rosa en el Estero Medina para clarificar el agua destinada al consumo humano antes de que apliquen los métodos de filtración y desinfección, porque al no eliminar los sólidos suspendidos, estos pueden albergar microorganismos patógenos que

no serán controlados adecuadamente mediante la adición de cloro. Además, la presencia de materia orgánica producto del arrastre de suelo agrícola y la degradación vegetal pueden formar muchos subproductos con la desinfección mediante cloro, entre los cuales se encuentran los trihalometanos, de los cuales existe evidencia científica que los cataloga como potenciales compuestos cancerígenos en animales (Rosero, Latorre, Torres, & Delgado, 2004).

Aparte de la justificación teórica y práctica del presente estudio, también esta investigación reportará beneficios desde el punto de vista ambiental, porque se utilizará un producto coagulante de origen natural, biodegradable y de fácil acceso en varias viviendas de la comunidad del Estero Medina, el cual no está asociado a los efectos que suelen vincularse a los productos coagulantes de origen químico, como las sales de aluminio que normalmente se usan en las plantas potabilizadoras, las cuales se han relacionado con efectos neurotóxicos, son causantes de encefalopatías y de la enfermedad de Alzheimer. En esta última, los síntomas se exacerban al consumir alimentos o agua que contengan el ion aluminio (Exley, 2017).

1.4 Delimitación de la investigación

- **Espacio:** La investigación se desarrolló en el Estero Medina, parroquia Bellamaría, cantón Santa Rosa. Coordenadas: S 3° 28' 42.835", O 79° 56' 2.282" (Anexo 9.1). Los ensayos experimentales se realizaron en los laboratorios de la Universidad Agraria del Ecuador.
- **Tiempo:** El estudio se llevó a cabo durante un lapso de dos (2) meses.
- **Población:** La población proyectada para el 2020 que está afectada es de 2949 habitantes de la parroquia Bellamaría (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Bellamaría Cantón Santa Rosa, 2015).

1.5 Objetivo general

Demostrar la eficiencia de la tuna *Opuntia ficus-indica* como biocoagulante para la clarificación del agua en el Estero Medina, parroquia Bella María, provincia de El Oro, mediante tratamientos de laboratorio y pruebas estadísticas.

1.6 Objetivos específicos

- Caracterizar el pH, turbidez inicial y SST las aguas del Estero Medina mediante ensayos de laboratorio.
- Explicar el comportamiento de la turbidez y el pH en las aguas del Estero Medina tratadas con el mucílago del biocoagulante *Opuntia ficus-indica* en forma fresca y desecada mediante análisis estadístico.
- Evaluar los parámetros pH, turbidez y SST en las aguas del Estero Medina tratadas con *Opuntia ficus-indica* mediante la comparación con las normas de calidad de agua vigentes.

1.7 Hipótesis

El biocoagulante *Opuntia ficus-indica* permite obtener remociones de turbidez superiores al 70 % para ser utilizado como coagulante primario en la clarificación del agua del Estero Medina.

2. Marco teórico

2.1 Estado del arte

Angulo, Ricardo y Coaquira (2020) desarrollaron un estudio con el objetivo de determinar la efectividad coagulante de la especie *Opuntia ficus-indica* en la sedimentación y purificación del agua turbia que se precipita en una cuenca lluviosa, a efecto de hacerla apta para consumo humano. El método experimental que aplicaron lo dividieron en dos etapas: (1) la obtención del coagulante natural y (2) la experimentación para determinar la efectividad del coagulante. La fuente de agua era proveniente de acequias y puquiales de las zonas altas del Valle de Cañete y los cladodios de la tuna también eran del mismo lugar donde recolectaron las muestras de agua. Para la preparación del coagulante utilizaron 1226,4 gramos del mucílago de la cactácea.

Para ello Angulo, Ricardo y Coaquira (2020), extrajeron la pulpa de la tuna, la cortaron en trozos y la deshidrataron a 60 °C durante 48 horas, para luego triturarlas hasta obtener un polvo amarillento que pasaron por un tamiz de 0,05 mm; para extraer los pigmentos agregaron etanol al 96 % como solvente por 2,5 horas, a fin de obtener un polvo húmedo color marfil, que fue secado a 30 °C.

En el estudio evidenciaron que por cada kilo del mucílago de *O. ficus-indica* se obtienen 79,6 g de coagulante. Luego, emplearon la prueba de jarras y aplicaron a las muestras de agua con turbidez inicial de 142 UNT las dosis de 30, 60 y 90 mg/L del coagulante en estudio. Los resultados permitieron obtener valores de turbidez correspondientes a 12,3; 12,1; y 10,7 UNT al aplicar dosis de 30, 60 y 90 mg/L, respectivamente. Además, el color inicial de 457 UC Pt-Co fue removido a valores de 13, 11,7; y 9,3 UC Pt-Co al emplear las dosis de 30, 60 y 90 mg/L de *O. ficus-indica*, respectivamente. En cuanto a los parámetros microbiológicos, lograron

eliminar *Salmonella* y reducir los coliformes totales, el recuento de *Escherichia coli* y *Staphylococcus*.sp. El pH se mantuvo inalterable. En conclusión, demostraron la efectividad coagulante de la cactácea *Opuntia ficus-indica* llegando a alcanzar remociones de turbidez que oscilaron entre 91,44 % y 92,47 %.

Otro estudio realizado fue el de Michelin et al. (2020), el cual tuvo como objetivo evaluar las mejores especies de cactus (*Opuntia ficus-indica*, *Cereus jamacaru* y *Cereus jamacaru monstrosus*) sobre la eliminación simultánea de patógenos, mejora de las condiciones físico-químicas, sin dejar residuos citotóxicos en el agua. Las pruebas las realizaron con agua de río y pequeños trozos de cladodios en dosis de 15, 25, 50 y 75 (g L⁻¹) en períodos de agitación de 2 min a 60 rpm y períodos de sedimentación de 30, 120 y 360 min. *O. ficus-indica* se desempeñó mejor que *C. jamacaru* en la eliminación de *E. coli*, turbidez, color, hierro y nitrato, y encontraron que una dosis de 25 g L⁻¹ de cactus es la más eficiente para el tratamiento del agua.

Esta dosis resultó para Michelin et al. (2020), en un tiempo máximo de exposición no citotóxica de 30 min para *O. ficus-indica* y de 120 min para *C. jamacaru*. *O. ficus-indica*, *C. jamacaru* y *C. jamacaru monstrosus* pudieron reducir la turbidez en un rango de 90 a 98% para todas las pruebas. La eficiencia de eliminación de color varió del 50 al 98%.

Considerando el potencial de alcanzar tasas de remoción superiores al 70% para un mayor número de contaminantes (*E. coli*, turbidez, hierro, color, nitrato), la mejor especie de cactus recomendada para tratar el agua es la *O. ficus-indica*, con una exposición máxima tiempo de 30 min para evitar la citotoxicidad. Considerando cuán eficientes han demostrado ser estos cactus en la remoción de contaminantes, y cuán extendidos y fáciles de cultivar son, podrían ser considerados como una

alternativa segura y de bajo costo a otros productos de coagulación-floculación en procesos de tratamiento de agua.

Atupaña y Guacho (2019) efectuaron una investigación que tuvo como objetivo determinar la eficiencia del *Opuntia ficus-indica* como biocoagulante para el tratamiento de aguas superficiales del río BuluBulu, donde comprobaron que este producto vegetal orgánico puede reemplazar a los compuestos químicos normalmente usados en el tratamiento de agua. La recolección de las muestras de agua la realizaron siguiendo lo establecidos en la Norma INEN 2169:2013 e INEN 2176:2013, luego realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos antes y después del tratamiento con el coagulante natural.

Para la obtención del biocoagulante realizaron las siguientes operaciones: selección, lavado, pelado, cortado, secado, molienda, tamizado, extracción sólido-liquido, por ultimo secado y pulverizado. Concluyeron que la determinación de la eficiencia promedio de la aplicación del biocoagulante de la penca de tuna (*Opuntia ficus-indica*) en el tratamiento de agua del río donde obtuvieron valores iniciales de turbiedad de 47,6 UNT, color 40 Pt/Cu y un pH de 7,49; y valores finales de turbiedad de 1,80 UNT, Color 14 Pt/Cu y un pH igual a 6,97, alcanzando un porcentaje de remoción de turbiedad igual a 96,21% y de color correspondiente a 65%.

Del mismo modo, se reporta el trabajo de Samame (2019), mediante el cual buscó determinar la dosis óptima del mucílago de *Opuntia ficus-indica* cuyo nombre común es tuna, para mejorar el agua del río La Leche para consumo humano del Centro Poblado Cerro Escute, Pacora Departamento de Lambayeque-Perú. Para el desarrollo de esta investigación empleó un diseño cuasi experimental con prueba de hipótesis con muestreo no probabilístico por conveniencia y utilizó la prueba de

jarras en el proceso de simulación para la coagulación-floculación. Las muestras de agua las recolectó de un solo punto del río La Leche. Para el tratamiento trabajó con cuatro dosis diferentes de coagulante natural del mucílago de *Opuntia ficus-indica*, realizó un análisis fisicoquímico a las muestras de agua antes y después del tratamiento para determinar la dosis óptima en la mejora de los valores de los parámetros iniciales del agua a tratar, analizó los parámetros que intervienen en la clarificación del agua como fueron el pH, Conductividad Eléctrica, Turbidez, Demanda Química de Oxígeno y Demanda Biológica de Oxígeno comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua Potable en el Perú (DS N° 004-2017-MINAM).

Los ensayos demostraron que al emplear agua con una turbidez inicial de 60 UNT y dosis de 25, 50, 75 y 100 mL del mucílago de *O. ficus-indica*, se logró remover la turbidez a valores de 14, 10, 7,90 y 4,10 UNT, respectivamente. Con los resultados pudo confirmar que al emplear 100 mL de mucílago de *Opuntia ficus-indica* en 800 mL de agua a tratar, se logran mejorar significativamente los valores obtenidos antes del tratamiento ajustándose a los ECA.

En este mismo orden de ideas, Lozano (2018) estudió el efecto en la disminución de la turbidez en el agua por floculantes de *Opuntia ficus-indica* (Tuna) con diferentes procesos de extracción en el río Chonta de Cajamarca, 2018. El polímero natural extraído de las pencas de tuna (*Opuntia ficus-indica*) se empleó como mucílago fresco obtenido a través de tres procesos de operaciones unitarias como fueron: extracción, licuado y escurrimiento. Este polímero se utilizó como coagulante natural en aguas del río Chonta de Cajamarca para evaluar la eficiencia del mucílago extraído de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como agente clarificante. Los ensayos se realizaron a escala de laboratorio, con agua turbia a una turbidez

inicial de 55 UNT. Los parámetros a medir fueron la turbidez, el pH, conductividad y dosis del coagulante (mucílago fresco). Como método estadístico se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor mediante el software Minitab. Los resultados indicaron que el mucílago fresco del proceso de extracción remueve la turbidez a un 82 %, reduciendo la turbidez del agua de 55 UNT a 10 UNT. Los procesos de extracción y licuado fueron menos eficientes en la disminución de la turbidez.

Igualmente, López (2018) evaluó la eficiencia del cactus *Opuntia ficus-indica* al emplearlo como coagulante natural de tipo vegetal para remover la turbiedad presente en muestras de agua sintética preparadas en el laboratorio, con valores de turbiedad inicial de 20, 50, 100, 300 y 500 UNT. Para ello, hizo la determinación de los parámetros óptimos del coagulante natural: dosis, concentración y pH, por cada nivel de turbidez. También comparó el coagulante natural con el sulfato de aluminio respecto a la variación de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua: turbiedad, pH, color y conductividad.

El diseño de investigación fue un Diseño Completamente al Azar (DCA) por cada tipo de coagulante y nivel de turbidez, el cual contempló seis tratamientos, correspondientes a las seis dosis del coagulante aplicado, con tres repeticiones por cada tratamiento, siendo la variable respuesta la turbidez residual. Para la validación estadística de los resultados de turbidez residual, utilizó el coeficiente de variabilidad en los datos de turbidez residual, en las pruebas de parámetros óptimos del coagulante natural, utilizó el software SPSS para realizar el Análisis de Varianza (ANOVA) a un nivel de significancia de 0.05. También empleó la prueba Dunnet para determinar la equivalencia estadística de las turbiedades residuales. Los resultados demostraron que con la aplicación del coagulante natural el intervalo de

remoción de turbiedad se ubicó entre 58 % y 86 %; las dosis óptimas para muestras con turbiedades iniciales de 20, 50, 100, 300 y 500 UNT fueron 30, 45, 55, 75 y 90 mg/L, respectivamente.

Finalmente, López (2018) culmina indicando que para muestras con turbidez baja (20-50 UNT) la concentración óptima fue del 2 %; para muestras de turbiedad media (100-300 UNT) fue del 1 %; y para muestras de 500 UNT fue de 0,5 %. El pH óptimo fue 9 para todos los diversos niveles de turbiedad. Por otra parte, esta investigación evidenció que el sulfato de aluminio tiene mayor eficiencia en la remoción de turbidez que el cactus *Opuntia ficus-indica*, sin embargo, con este último se obtuvo un 86 % de remoción de turbidez en muestras de 500 UNT, comprobando su eficiencia en muestras de turbidez alta.

Además, comprobó que el sulfato de aluminio es superior en la remoción de color, en comparación al coagulante natural, sin embargo, con el sulfato de aluminio observó un incremento considerable en la conductividad y disminución del pH en las muestras. Al emplear el cactus *Opuntia ficus-indica* no se evidenciaron variaciones significativas en el pH y conductividad final de las muestras.

Asimismo, Tarrillo y Tenorio (2019) evaluaron la eficiencia de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante-floculante en la remoción de turbidez. Para ello realizaron los análisis del agua proveniente de la acequia El Pueblo en la ciudad de Ferreñafe con la finalidad de determinar los parámetros de control físico, químico y biológico. Luego, aplicaron el coagulante derivado de la tuna en 3 distintas formas (cáscara de tuna, gel de tuna y cáscara más gel de tuna). Los resultados demostraron lo siguiente: la evaluación de los parámetros físico-químicos y biológicos al aplicar 26 g de cáscara de *Opuntia ficus-indica* como coagulante-floculante a las aguas de la acequia el Pueblo de la ciudad de Ferreñafe se produjo

una baja efectividad para remover la turbidez y los coliformes, obteniendo como resultado 50 UNT de turbidez y 1700 (NMP/100 mL) de coliformes totales.; al aplicar 26 g de gel de *Opuntia ficus-indica* (tuna) indicaron una considerable efectividad del 62 % en la reducción de turbidez; al aplicar 13 g de cáscara y 13 g de gel de *Opuntia ficus-indica* se obtuvo la reducción de turbidez hasta 30,29 UNT y una remoción de 63 %.

Al comparar los parámetros físico-químicos y biológicos antes y después de los tratamientos, con cáscara (*O. ficus-indica*) (26 g); con gel (*O. ficus-indica*) (26 g) y con cáscara (13 g) más gel de *O. ficus-indica* (13 g), observaron una alta efectividad el tratamiento (T3), ya que removi6 el 63 % de turbidez de las aguas antes mencionadas de la ciudad de Ferreñafe. Llevar a cabo el proceso de coagulación-floculación en el tratamiento del agua es fundamental, porque permitirá una mejor calidad de agua para los habitantes de la ciudad de Ferreñafe, especialmente si durante el proceso de tratamiento se emplean coagulantes naturales como es el caso de la especie *O. ficus-indica*, que es ambientalmente amigable y es de fácil acceso para la población; además, este producto no genera residuos contaminantes cuando se usa como coagulante-floculante, por lo que las personas de bajos ingresos pueden obtener agua de calidad para su uso.

Morej6n (2017) tambi6n efectu6 un estudio en el cual utiliz6 el muc6lago de la tuna *Opuntia ficus-indica* de forma fresca para la clarificaci6n del agua de consumo humano en la comunidad de Pusir Grande, provincia del Carchi, aprovechando que esta materia prima existe en la zona. Los ensayos los realiz6 a escala laboratorio, para lo cual emple6 agua cruda proveniente del tanque desarenador de la planta de tratamiento de la comunidad. Las pruebas de tratamiento de agua que realiz6, le permitieron evaluar la eficacia del muc6lago de tuna en el proceso de

coagulación-floculación de agua cruda, donde analizó los parámetros que intervienen en la clarificación del agua como fueron: pH, turbidez, dureza, color y sólidos disueltos totales. Luego comparó los resultados de la Norma Técnica Ecuatoriana (Agua Potable Requisitos, NTE INEN 1 108:2011 Cuarta revisión 2011-06) con los del agua de consumo tratada con *O. ficus-indica*.

La turbidez se redujo de 59, 10 a 5,89 UNT, con lo cual confirmó que el uso del mucílago de tuna en una relación volumétrica 25 % mucílago – 75 % agua a tratar actúa efectivamente en el proceso de coagulación- floculación. Finalmente, el análisis costo- beneficio demostró el éxito de la utilización del mucílago de tuna, ya que se aprovecha la materia prima existente y que, al mismo rendimiento, los valores demuestran que hay una inversión mínima al emplear el coagulante natural frente al coagulante químico.

El uso de *Opuntia ficus-indica* fue estudiado como coadyuvante de la coagulación. Es así que, Contreras, Mendoza, Salcedo, Olivero y Mendoza (2015) evaluaron la eficiencia del mucílago extraído del Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario al sulfato de aluminio, en el proceso de clarificación de agua proveniente del Rio Magdalena. La clarificación la realizaron mediante la Prueba de jarras, teniendo en cuenta factores como concentración y proporción de los coagulantes, pH y velocidad de agitación; para evaluar la turbidez (UNT), color (UPC), sólidos totales disueltos (mg/L), pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) en el agua tratada.

Los resultados reflejaron que, aplicando una cantidad máxima de 20 % de mucílago de nopal en la proporción de coagulantes y una velocidad de agitación de 200 rpm, se reduce la turbidez del agua hasta valores inferiores a 2 UNT, alcanzando eficiencias superiores al 50 % en la remoción de turbidez, siendo las

más efectivas entre 96-98 %. Lograron reducir totalmente el color hasta 0 UPC, y el contenido de STD hasta valores menores a 200 mg/L. El coagulante natural no afectó notablemente el pH del agua tratada y la conductividad aumentó en algunos tratamientos posiblemente a causa del coagulante primario. Concluyeron que el mucílago de nopal como coagulante complementario al sulfato de aluminio mostró efectividad en la clarificación del agua.

Cárdenas y Díaz (2018) elaboraron una propuesta para el empleo de *Opuntia ficus-indica* como coagulante, porque el departamento de Nariño se encuentra en el nivel alto del Índice de Riesgo de la Calidad de Agua para Consumo Humano – IRCA, causado por la deficiente infraestructura, sistemas improvisados en plantas de tratamiento, mano de obra no calificada para la operación del sistema de tratamiento de agua potable, también el costo y manejo de algunos aditivos usados en el proceso de potabilización o el acceso a ellos en zonas rurales. Por lo anterior, plantearon el uso de un coagulante natural para brindar una alternativa en el proceso de clarificación de agua potable en zonas del departamento que se caracterizan por deficiencias en el tratamiento tecnificado del agua.

Esta investigación evaluó la eficiencia del extracto del cactus *Opuntia ficus indica* a través de la prueba de Jarras en agua cruda sintética creada en laboratorio. La evaluación del coagulante natural la realizaron mediante la comparación con el policloruro de aluminio (PAC), un coagulante de tipo químico con excelente desempeño en la remoción de turbiedad y color; para esto, se plantearon dos escenarios de estudio con base a dos parámetros de evaluación, parámetros exigidos por la Resolución 2115 de 2017; turbiedad y color: en el escenario A se establecieron valores bajos de los parámetros; por el contrario en el escenario B valores de los parámetros altos. Los resultados obtenidos demostraron que el

extracto de *Opuntia ficus indica* es una opción viable como coagulante alternativo, puesto que presenta una remoción entre 77 a 98 % en turbiedad y de 80 a 98 % en el color del agua.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 El proceso de potabilización del agua

El agua se capta en forma bruta de aguas superficiales o subterráneas y se somete a un proceso de potabilización a fin de que sea apta para el consumo humano. Para ello se construyen estructuras y dispositivos, generalmente embalses, cerca de una fuente de recursos hídricos, donde se almacena y se trata el agua. También se puede potabilizar el agua del mar, pero hay que utilizar tecnologías apropiadas para eliminar las sales.

Este proceso de tratamiento comprende varias fases, según las características del agua, que son: desbaste (separación de sólidos gruesos), coagulación-floculación-sedimentación (remoción de partículas coloidales), filtración (separación de sólidos suspendidos), afino con carbón activado (reducción de la materia orgánica) y desinfección (eliminación de microorganismos patógenos).

Según el grado de tratamiento que debe aplicarse a las aguas, estas se clasifican en tres grandes grupos: Tipo A1, A2 y A3 (Martínez, 2019). La descripción de estos tratamientos se muestra en la Tabla 1.

El proceso de potabilización del agua comprende la clarificación, la filtración y la desinfección. La clarificación tiene como propósito retirar sólidos suspendidos y materia coloidal que le confieren turbidez y color al agua, convirtiéndolos en agregados de mayor tamaño y densidad que se puedan remover más fácilmente. A su vez, el proceso de clarificación involucra tres subprocesos, que son: coagulación, floculación y sedimentación. En la coagulación se agregan productos

que ayudan a desestabilizar los sólidos suspendidos para que no estén dispersos, mientras que en la floculación se agrupan las partículas formando agregados de mayor tamaño llamados flóculos; y, en la sedimentación los agregados de mayor tamaño se van al fondo por la fuerza de la gravedad y se remueven más fácilmente, dejando el agua clarificada (Cogollo, 2011).

Tabla 1. Clasificación de los tratamientos de acuerdo a los tipos de aguas

Grado de tratamiento	Composición del tratamiento	Descripción
TIPO A1	Tratamiento físico simple y desinfección	Filtración rápida + Desinfección
TIPO A2	Tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección	Precloración + Coagulación-Floculación + Sedimentación-Decantación + Filtración + Desinfección
TIPO A3	Tratamiento físico y químico intensivo, afino y desinfección	Precloración + Coagulación-Floculación + Sedimentación-Decantación + Filtración + Afino con carbón activado + Desinfección

Fuente: Martínez, 2019

2.2.2 Parámetros de calidad del agua

Los parámetros que se deben controlar para garantizar la calidad del agua son numerosos y se clasifican en físicos, químicos y biológicos. Pero, entre los de tipo fisicoquímico más importantes, se encuentran la turbidez, el pH y el color. La turbidez es causada por partículas en suspensión o coloides, los cuales por su tamaño se encuentran suspendidos y le quitan la transparencia al agua. El pH es el grado de acidez o alcalinidad que presenta el agua. El color puede estar relacionado con la turbidez, comúnmente se atribuye a la presencia de taninos, ácidos húmicos y fúlvicos, pero también puede ser causado por descargas industriales (Barrenechea, 2004).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la turbidez debe ser menor a 0,1 UNT para que la desinfección sea eficaz. El pH resulta más eficaz para el proceso de desinfección a valores con un máximo de 8 unidades, pero tampoco debe ser muy bajo, porque puede ocasionar corrosión en los sistemas de abastecimiento y distribución, así como en tuberías y electrodomésticos de las viviendas.

Normalmente en los sistemas de distribución suele oscilar entre 6,5 y 8 unidades. En cuanto al color, este se considera aceptable cuando es inferior a 15 Unidades de Color (Organización Mundial de la Salud, 2005).

De acuerdo a las normativas vigentes en el Ecuador, los parámetros turbidez, pH y color no serán objetables cuando tengan valores de 5 UNT (máximo), 6-9 unidades y 15 UC Pt-Co (máximo), respectivamente (Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador, 2015).

Por otra parte, las aguas que requieren tratamiento convencional de coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección, deben cumplir con una serie de características de acuerdo a la Tabla 1 del Anexo 1 del Acuerdo Ministerial No. 097-A (Registro Oficial. Edición Especial N° 387, 2015). Los valores de la misma se visualizan en la tabla 2.

Tabla 2. Criterios de calidad de aguas para consumo humano y doméstico

PARÁMETRO	EXPRESADO COMO	UNIDAD	CRITERIO DE CALIDAD
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	m/l	0,3
Arsénico	As	mg/l	0,1
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	1000
Bario	Ba	mg/l	1
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro	CN ⁻	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cobre	Cu	mg/l	2,0

Color	Color real	Unidades de Platino-Cobalto	75,0
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,05
Fluoruro	F ⁻	mg/l	1,5
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	<4
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	<2
Hierro total	Fe	mg/l	1,0
Mercurio	Hg	mg/l	0,006
Nitratos	NO ₃ ⁻	mg/l	50,0
Nitritos	NO ₂ ⁻	mg/l	0,2
Potencial Hidrógeno	pH	unidades de pH	6-9
Plomo	Pb	mg/l	0,01
Selenio	Se	mg/l	0,01
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	500,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	0,2
Turbiedad	unidades nefelométricas de turbiedad	UNT	100,0
Nota: Podrán usarse aguas con turbiedades y coliformes fecales ocasionales superiores a los indicados en esta Tabla, siempre y las características de las aguas tratadas sean entregadas de acuerdo con la Norma INEN correspondiente.			

Fuente: Registro Oficial. Edición Especial N° 387 (2015)

2.2.3 Coagulación-floculación

En la fase de clarificación los subprocesos de coagulación y floculación tienen gran importancia. La coagulación se inicia al agregar una sustancia denominada coagulante que rompe con las fuerzas electrostáticas que mantienen separadas las partículas en suspensión y puedan atraerse entre sí. La agitación rápida ayuda a que este subproceso se realice de forma más eficiente (Cogollo, 2011).

En general, la coagulación es un proceso donde el potencial repulsivo de la doble capa eléctrica del coloide es reducido, de tal manera, que se pueden producir micro-partículas. Estas micro-partículas chocan con otras y forman estructuras más

grandes (flóculos) en el proceso de floculación (Matilainen, Vepsäläinen y Sillanpää, 2010).

La floculación es el subproceso que le sigue a la coagulación y consiste en la aglutinación o agregación de partículas para formar agregados o flóculos de mayor tamaño y densidad (Ramírez y Jaramillo, 2015).

Los mencionados subprocesos se emplean para: remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente, remoción de color verdadero y aparente, eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación, destrucción de algas y plancton en general, eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros (Arboleda, 2000).

Según Andía (2000), existen cuatro mecanismos que pueden actuar en el fenómeno de la coagulación, los que se describen a continuación:

- (a) *Compresión de la doble capa.* Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas, esto se consigue solamente con los iones del coagulante.
- (b) *Absorción y neutralización de cargas.* Las partículas coloidales poseen carga negativa en sus superficies, estas cargas llamadas primarias atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide.
- (c) *Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado.* Las partículas coloidales desestabilizadas, se pueden atrapar dentro de un flóculo. Cuando

se adiciona una cantidad suficiente de coagulantes, habitualmente sales de metales trivalentes como el sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, o cloruro férrico FeCl_3 , el flóculo está formado de moléculas de $\text{Al}(\text{OH})_3$ o de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales aceleran la formación del precipitado. Estas últimas forman como un anillo durante la formación del flóculo; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. Esto significa que, una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menor cantidad de coagulante.

- (d) *Adsorción y puente*. En cualquier caso, se obtiene el tratamiento más económico utilizando un polímero aniónico, cuando las partículas están cargadas negativamente. Este fenómeno es explicado por la teoría del “puente”. Las moléculas del polímero que son muy largas contienen grupos químicos que pueden absorber las partículas coloidales. La molécula de polímero puede así absorber una partícula coloidal en uno de sus extremos, mientras que los otros sitios son libres para absorber otras partículas. Por eso se dice que las moléculas de los polímeros forman un “puente” entre las partículas coloidales. Esto puede conducir a una reestabilización de las partículas ocasionando el incremento de la turbidez por una excesiva carga de polímeros.

2.2.4 Tipo de coagulantes

En las plantas de potabilización del agua generalmente se utilizan productos coagulantes de origen químico, como las sales de aluminio o de hierro: $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Barrenechea, 2004), $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Romero, 2005).

Sin embargo, a raíz de los efectos que pueden ocasionar, también se ha propuesto el uso de coagulantes de origen natural que pueden ser extraídos de especies vegetales como *Moringa oleifera* (Meza-Leones, Riaños-Donado, Mercado-Martínez, Olivero-Verbel y Jurado-Eraso, 2018), *Opuntia ficus-indica* (Atupaña y Guacho, 2019) (Felkai-Haddache, Mamou-Belhabib, Picton, Madani y Rihouey, 2016), *Solanum tuberosum* (Camacho-Oviedo, Campos-Núñez, Mercado-Martínez, Cubillán-Acosta y Castellar-Ortega, 2020), banano (Sierra-Julio, Navarro-Silva, Mercado-Martínez, Flórez-Vergara y Jurado-Eraso, 2019), *Carica papaya* (Díaz, 2019); o de especies animales como el quitosano extraído de cangrejo o camarón (Oña y Venegas, 2020) (Arancibia, 2011), la quitina (Fuentes, Mendoza, Chávez, Cedeño y Ortiz, 2017) y la gelatina de huesos bovinos (Briceño, Fuentes, Mendoza, Bolaños y Caldera, 2014). Estos coagulantes han sido estudiados a escala laboratorio en aguas crudas y sintéticas, permitiendo obtener remociones de turbidez superiores a 70 %, lo cual hace que puedan ser clasificados como coagulantes primarios.

2.2.5 *Opuntia ficus-indica*

Opuntia ficus-indica es una de las cactáceas de mayor importancia desde el punto de vista agronómico, tanto por sus sabrosos frutos como por sus tallos que se utilizan como forraje o se consumen como verdura. En su forma inermis o sin espinas, esta especie es una forma hortícola, no se encuentra de manera silvestre. Su domesticación se inició hace unos 8000 años. La forma silvestre (con espinas) de la cual se obtuvo la forma hortícola (sin espinas, *O. ficus-indica* en sentido restringido), fue descrita inicialmente como *Opuntia megacantha* Salm-Dick (Kiesling, 1998).

Tuna es el nombre comúnmente utilizado en países como Perú, Chile, Argentina, México y Colombia para nombrar a la planta denominada científicamente *Opuntia ficus-indica*, perteneciente a la familia Cactaceae. En otros países es conocida como tunera, nopal, pita, penca, higuera de chumbo, higuera de pala o chumbera. La misma es originaria de México. La especie *O. ficus-indica* se caracteriza morfológicamente por presentar tallos suculentos y articulados llamados cladodios o pencas, los cuales tienen forma de raqueta ovoide con longitudes que pueden llegar hasta 60-70 cm. Su tejido es carnoso y en la región central del cladodio presenta una red de tejido rico en celulosa que al pasar del tiempo se endurece, dándole rigidez a la planta. Las pencas varían en forma, grosor y color (verde claro hasta gris o ceniza). Los cladodios y los frutos contienen fibra, colides, carotenoides, betalaínas, minerales, vitamina C e hidrocoloides como mucílagos. A estos últimos se le atribuyen propiedades coagulantes (Olivero, Aguas, Mercado, Casas y Montes, 2014).

En la figura 1 se muestran gráficamente los cladodios, flores y frutos de la cactácea *Opuntia ficus-indica* y en la figura 2 se observan especímenes localizados en áreas del Estero Medina, parroquia Bellamaría, cantón Santa Rosa, provincia de El Oro, Ecuador. Se observa que la forma de los cladodios es como una raqueta de tenis, el cual puede presentar espinas pequeñas o no presentarlas. Sus flores generalmente son amarillas o rosadas y los frutos son ovoides casi siempre sin espinas y con abundantes semillas.

La clasificación botánica de la cactácea *Opuntia ficus-indica* se detalla en la tabla 3. Pertenece al género *Opuntia*, el cual presenta las características que detalla (Porras-Flórez, Albesiano y Arrieta-Violet, 2017)

Hábito de crecimiento: erecto, hasta 3,2 m de altura. Tronco: central de 1,10 m de alto, pero puede ramificarse desde la base. Cladodio joven y adulto: elípticos a obovados, 20–45 cm de largo y 15–21 cm de ancho, verde–glaucos, los cladodios jóvenes emergen de la parte media y alta del cladodio adulto, pueden surgir hasta cinco cladodios jóvenes. De cero a una espina central, 0,2–1,0 cm de largo, acicular, divaricada, blanca, sin espinas radiales. Máximo una espina por areola en la parte media del cladodio. Areolas: redondas, blancas, 0,1–0,2 cm de diámetro y 0,1 cm de alto, distancia entre areolas de 2–3 cm; gloquidios no observables. Flores: apicales, de 8 cm de largo, perigonio de 2,5–3,0 cm de diámetro, ovario de 0,8 cm de largo, hipanto de 5,0–5,5 cm de largo con gloquidios marrón–claro, tépalos amarillos a veces con tono rosado, externos de 0,7–1,0 cm de largo, intermedios e internos, de 1,5–2,0 cm y 1,5–2,5 de largo respectivamente, estilo verde–claro a blanco, de 1 cm de largo, lóbulos del estigma verdes, de 0,3–0,4 cm de largo. Frutos: obovados, de 7,0–7,5 cm largo y 4,0–4,5 cm de diámetro, exocarpo amarillo, mesocarpo y endocarpo amarillo–anaranjado. Semillas: redondas, por lo general blancas, 5 mm de diámetro, arilo del mismo color y de 1 mm o menos de grosor (p. 121).

Tabla 3. Clasificación botánica de *Opuntia ficus-indica*

Componente	Característica
Reino	Vegetal
Subreino	Embryophyta
División	Angiosperma
Clase	Dicotiledónea
Subclase	Dialipétalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Tribu	Opuntiae
Subfamilia	Opuntioideae
Género	<i>Opuntia</i>
Subgénero	Platyopuntia
Especie	<i>Opuntia ficus-indica</i>

Fuente: Bravo-Hollis, 1978 citado por Cuacés, 2013

Las cactáceas pertenecientes a la especie *Opuntia ficus-indica* presenta ciertas características químicas que en algunas investigaciones las relacionan con su eficiencia como coagulante. En la Tabla 4 se reportan las características químicas de los cladodios específicamente.

Tabla 4. Características químicas de cladodios de *Opuntia ficus-indica*

Característica	Edad de los cladodios		
	1 a 4 meses	5 a 8 meses	9 a 12 meses
Acidez titulable (g ácido málico·100 g ⁻¹)	0,76 ± 0,11 ^a	0,49 ± 0,11 ^b	0,41 ± 0,10 ^b
pH	4,52 ± 0,05 ^a	4,08 ± 0,05 ^b	4,24 ± 0,20 ^b
Sólidos solubles totales (°Brix)	5,59 ± 0,29 ^a	5,09 ± 0,58 ^a	4,98 ± 0,39 ^a
Ácido ascórbico (mg·100 g ⁻¹)	17,34 ± 2,30 ^a	12,88 ± 3,73 ^a	12,16 ± 3,52 ^a
Humedad (g·100 g ⁻¹)	91,99 ± 0,77 ^a	92,20 ± 1,09 ^a	91,89 ± 1,21 ^a
Proteína (g·100 g ⁻¹)	0,60 ± 0,04 ^a	0,50 ± 0,01 ^b	0,43 ± 0,02 ^c
Grasa (g·100 g ⁻¹)	0,14 ± 0,02 ^a	0,19 ± 0,02 ^b	0,15 ± 0,02 ^a
Cenizas (g·100 g ⁻¹)	1,32 ± 0,05 ^a	1,49 ± 0,05 ^b	1,51 ± 0,08 ^b
Carbohidratos (g·100 g ⁻¹) *	5,95	5,62	6,02
Pectina total (g AGA·100 g ⁻¹)**	0,24 ± 0,02 ^a	0,36 ± 0,04 ^b	0,37 ± 0,03 ^b
Hierro (mg·100 g ⁻¹)	0,70 ± 0,24 ^a	0,18 ± 0,02 ^b	0,18 ± 0,07 ^b
Calcio (mg·100 g ⁻¹)	126,06 ± 8,83 ^a	173,66 ± 33,91 ^{ab}	193,48 ± 10,23 ^b
Potasio (mg·100 g ⁻¹)	376,32 ± 19,82 ^a	307,39 ± 13,70 ^a	256,17 ± 101,64 ^a

Resultados expresados como el promedio ± desviación estándar de 20 cladodios con 5 réplicas por edad. Letras diferentes indican diferencia estadísticamente significativa a un $\alpha=0,05$. *Determinado por diferencia. **AGA= ácido anhidrogalacturónico.

Fuente: Barazarte et al.,2017

Un análisis fitoquímico de cladodios de la especie *Opuntia ficus-indica* reveló un pH= 4,42, humedad (90,23 %), calcio (0,27 %), hierro (32,55 ppm), además de la presencia de flavonoides (10,16 mg/g) y saponinas (0,70 mg/g) (Villabona, Paz, & Martínez, 2013). Además, en sus frutos presenta mayor porcentaje de ácido anhidrogalacturónico que *O. elatior* y *O. boldhingii* (Monttilla, Tovar, & Pacheco, 2020).

Por otra parte, un análisis fitoquímico de la especie *Opuntia megacantha* fue realizado por (Pascoe-Ortiz et al., 2019), quienes utilizaron el sistema de cruces para indicar la presencia o ausencia del metabolito en la muestra de jugo de cladodios. También observaron la presencia moderada de cumarinas en los jugos provenientes de cladodios maduros, las cuales son escasas en los jugos de cladodios tiernos. Además, observaron la presencia escasa de fenoles en cuatro tipos de jugo que estudiaron e indicaron la presencia abundante de carbohidratos en todos ellos.

2.2.5.1 Distribución en el Ecuador

La especie *Opuntia ficus-indica* fue introducida en el Ecuador y predomina en las provincias de Loja, Chimborazo, Cotopaxi, Imbabura y Los Ríos. Otra especie de este mismo género es *Opuntia quitensis*, se encuentra principalmente en las provincias de Loja, Azuay, Chimborazo, Pichincha y El Oro (Aguirre, 2012).

2.2.5.2 Posibles mecanismos de coagulación

Para el coagulante que se obtiene a partir de la especie *Opuntia ficus-indica* se han indicado posibles mecanismos de coagulación. En unos casos, el pH alcalino de la floculación sugiere que el mecanismo de coagulación es por adsorción con efecto puente entre partículas. Este mecanismo fue validado mediante una extracción de agua a pH igual a 10 como valor óptimo de floculación, luego se acidificó hasta alcanzar un pH de 7 unidades, a fin de facilitar la precipitación de las moléculas floculantes consideradas activas. La fuerte propiedad floculante del extracto y la titulación mostraron un pKa de $9,0 \pm 0,6$, el cual corresponde a grupos fenólicos que pudieran ser taninos y lignina (Bouaouine, Bourven, Khalil y Baudu, 2018).

De igual manera, otros autores también coinciden en cuanto al tipo de mecanismo de coagulación. Pues, aun cuando se ha reportado que el mecanismo de coagulación predominante en *Moringa oleifera* es la neutralización por carga, los resultados de las mediciones del potencial Z, así como las imágenes de microscopía electrónica de transmisión de flóculos formados por *Opuntia* spp., sugieren que estos coagulantes operan a través de mecanismos diferentes, y también que, *Opuntia* spp. predominantemente funciona mediante el mecanismo de coagulación puente (Miller, Fugate, Oyanedel, Smith, & Zimmerman, 2008).

2.3 Marco legal

2.3.1 Constitución de la República del Ecuador

Los Artículos de la Constitución de la República del Ecuador (Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador, 2008) sobre los cuales se fundamentará esta investigación son:

TITULO II DERECHOS. Capítulo Segundo. Derechos del buen vivir. Sección primera. Agua y alimentación.

Art. 12.- El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida (p. 12).

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados (p. 13).

Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua. Se prohíbe el desarrollo, producción, tenencia, comercialización, importación, transporte, almacenamiento y uso de armas químicas, biológicas y nucleares, de contaminantes orgánicos persistentes altamente tóxicos, agroquímicos internacionalmente prohibidos, y las tecnologías y agentes biológicos experimentales nocivos y organismos genéticamente modificados perjudiciales para la salud humana o que atenten contra la soberanía alimentaria o los ecosistemas, así como la introducción de residuos nucleares y desechos tóxicos al territorio nacional (p. 13).

TITULO II DERECHOS. Capítulo Segundo. Derechos del buen vivir. Sección sexta. Hábitat y vivienda.

Art. 32.- La salud es un derecho que garantiza el Estado, cuya realización se vincula al ejercicio de otros derechos, entre ellos el derecho al agua, la alimentación, la educación, la cultura física, el trabajo, la seguridad social, los ambientes sanos y otros que sustentan el buen vivir. El Estado garantizará este derecho mediante políticas económicas, sociales, culturales, educativas y ambientales; y el acceso permanente, oportuno y sin exclusión a programas, acciones y servicios de promoción y atención integral de salud, salud sexual y salud reproductiva. La prestación de los servicios de salud se regirá por los principios de equidad, universalidad, solidaridad, interculturalidad, calidad, eficiencia, eficacia, precaución y bioética, con enfoque de género y generacional (p. 17).

TITULO II DERECHOS. Capítulo séptimo. Derechos de la naturaleza.

Art. 71.- La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos. Toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad pública el cumplimiento de los derechos de la naturaleza. Para aplicar e interpretar estos derechos se observarán los principios establecidos en la Constitución, en lo que proceda. El Estado incentivará a las personas naturales y jurídicas, y a los colectivos, para que protejan la naturaleza, y promoverá el respeto a todos los elementos que forman un ecosistema (p. 32).

Art. 72.- La naturaleza tiene derecho a la restauración. Esta restauración será independiente de la obligación que tienen el Estado y las personas naturales o jurídicas de indemnizar a los individuos y colectivos que dependan de los sistemas naturales afectados. En los casos de impacto ambiental grave o permanente, incluidos los ocasionados por la explotación de los recursos naturales no renovables, el Estado establecerá los mecanismos más eficaces para alcanzar la restauración, y adoptará las medidas adecuadas para eliminar o mitigar las consecuencias ambientales nocivas (p. 33).

Capítulo segundo. Biodiversidad y recursos naturales. Sección tercera Patrimonio natural y ecosistemas.

Art. 404.- El patrimonio natural del Ecuador único e invaluable comprende, entre otras, las formaciones físicas, biológicas y geológicas cuyo valor desde el punto de vista ambiental, científico, cultural o paisajístico exige su protección, conservación, recuperación y promoción. Su gestión se sujetará a los principios y garantías consagrados en la Constitución y se llevará a cabo de acuerdo al ordenamiento territorial y una zonificación ecológica, de acuerdo con la ley (p. 120).

Capítulo segundo. Biodiversidad y recursos naturales. Sección sexta. Agua.

Art. 411.- El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y

cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua (p. 121).

Capítulo segundo. Biodiversidad y recursos naturales. Sección séptima. Biosfera, ecología urbana y energías alternativas.

Art. 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua (p. 122).

2.3.2 Reglamentado en el Acuerdo Ministerial 028

Se considerarán algunos artículos establecidos en el reglamentado en el Acuerdo Ministerial 028 (Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador, 2015), tal y como se señala:

Sección III. Calidad de componentes abióticos. Parágrafo I. Del agua.

Art. 214.- De la calidad del agua. Son las características físicas, químicas y biológicas que establecen la composición del agua y la hacen apta para satisfacer la salud, el bienestar de la población y el equilibrio ecológico. La evaluación y control de la calidad de agua, se la realizará con procedimientos analíticos, muestreos y monitoreos de descargas, vertidos y cuerpos receptores; dichos lineamientos se encuentran detallados en el Anexo I del presente Libro. En cualquier caso, la Autoridad Ambiental Competente, podrá disponer al Sujeto de Control responsable de las descargas y vertidos, que realice muestreos del cuerpo de agua receptor. Toda actividad antrópica deberá realizar las acciones preventivas necesarias para no alterar y asegurar la calidad y cantidad de agua de las cuencas hídricas, la alteración de la composición físico-química y biológica de fuentes de agua por efecto de descargas y vertidos líquidos o disposición de desechos en general u otras acciones negativas sobre sus componentes, conllevará las sanciones que correspondan a cada caso; cuando en cumplimiento de las normas de vertimiento, el o los regulados produzcan concentraciones en el cuerpo receptor que excedan los criterios de calidad para el uso o usos asignados al recurso, la Autoridad Ambiental Competente, en coordinación con la Autoridad Única del Agua, podrá exigir valores más restrictivos para los parámetros de descargas y vertidos (p. 56).

2.3.3 Acuerdo Ministerial 097-A

Acuerdo Ministerial No. 097-A. Anexo 1 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Normas de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua. Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua (Registro Oficial. Edición Especial N° 387, 2015)

5.1.1 Criterios de calidad para aguas de consumo humano y uso doméstico

5.1.1.1 Se entiende por agua para consumo humano y uso doméstico aquella que es obtenida de cuerpos de agua, superficiales o subterráneas, y que luego de ser tratada será empleada por individuos o comunidades en actividades como: a) Bebida y preparación de alimentos para consumo humano, b) Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios (p. 12).

5.1.1.2 Esta Norma aplica a la selección de aguas captadas para consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieran de tratamiento convencional, para lo cual se deberán cumplir con los criterios indicados en la TABLA 1. (p. 85). (Tabla 2).

5.1.1.3 De ser necesario para alcanzar los límites establecidos en la Norma INEN para agua potable se deben implementar procesos de tratamiento adecuados y que permitan alcanzar eficiencias óptimas, con la finalidad de garantizar agua de calidad para consumo humano (p. 12).

3. Materiales y métodos

3.1 Enfoque de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

Para estudiar el biocoagulante *Opuntia ficus-indica* se realizó una investigación de tipo experimental. En la misma se midió el comportamiento de las variables para demostrar qué tan efectiva es esta cactácea para la remoción de la turbidez en las aguas del Estero Medina.

En cuanto al nivel de conocimiento, esta fue de tipo explicativa, porque se exploraron relaciones causales que ayudaron a determinar los factores con mayor efecto en la remoción de turbidez al aplicar este biocoagulante.

3.1.2 Diseño de investigación

El diseño de la investigación que se empleó fue un diseño de tipo experimental, pues se estableció el posible efecto de una causa que se manipula. En el presente estudio, se manipularon unas variables y otras se mantuvieron constantes cuando se estudió el comportamiento del biocoagulante *Opuntia ficus-indica* en aguas del Estero Medina. Manipular la variable independiente en dos niveles, permitió establecer cómo diferentes niveles de la variable independiente produjeron diversos efectos. Se manipularon intencionalmente las variables independientes: método de preparación del coagulante, pH inicial, turbidez inicial y dosis del biocoagulante. Se mantuvieron constantes otras variables como la temperatura, el tiempo y la velocidad de agitación en el equipo de jarras.

3.2 Metodología

3.2.1 Variables

Para esta investigación de tipo experimental se seleccionaron dos tipos de variable: independiente y dependiente. Específicamente, se utilizaron cuatro variables independientes y una variable dependiente.

3.2.1.1 Variable independiente

- Método de preparación del biocoagulante
- pH inicial
- Turbidez inicial (UNT)
- Dosis del biocoagulante (mg/L)

3.2.1.2 Variable dependiente

- Turbidez final (UNT)

3.2.2 Tratamientos

Para los tratamientos a ejecutar, de conformidad con lo que es un diseño factorial, se utilizaron cuatro factores o variables independientes y dos niveles para cada uno de los factores, tal y como se indica a continuación:

- Método de preparación del biocoagulante: nivel 1 (mucílago fresco) y nivel 2 (mucílago desecado)
- pH inicial: nivel 1 (pH ácido=6) y nivel 2 (pH alcalino= 8).
- Turbidez inicial: nivel 1 (turbidez baja=100 UNT) y nivel 2 (turbidez alta=400 UNT).
- Dosis del biocoagulante: nivel 1 (dosis baja=50 mg/L) y nivel 2 (dosis alta=200 mg/L).

El diseño factorial presenta factores y niveles en diferente cantidad, por lo cual difiere del cuadrado latino, dado que, en este último, el número de factores y niveles son iguales.

Tabla 5. Distribución de los tratamientos

EXPERIMENTO O TRATAMIENTO	FACTORES O VARIABLES INDEPENDIENTES			
	FACTOR 1 Método de preparación	FACTOR 2 pH inicial	FACTOR 3 Turbidez inicial	FACTOR 4 Dosis
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	1	-1	-1	1
10	-1	-1	-1	1
11	1	1	-1	1
12	-1	1	-1	1
13	1	-1	1	1
14	-1	-1	1	1
15	1	1	1	1
16	-1	1	1	1

Ruiz, 2021

En vista de que, se estudiaron cuatro factores (método de preparación del biocoagulante, pH inicial, dosis del biocoagulante y turbidez inicial) con dos niveles cada uno, los tratamientos se calcularon a partir de la fórmula 2^4 , resultando 16 tratamientos como se muestran en la tabla 5.

En lenguaje estadístico, el nivel 1 se simboliza con -1 y el nivel 2 con 1, para cada una de las variables independientes o factores.

Los tratamientos se realizaron por duplicado y en total se hicieron 32 experimentos o corridas.

3.2.3 Diseño experimental

Según el tipo de investigación, se aplicó un diseño factorial, donde las muestras de agua que se recolectaron en el Estero Medina fueron asignadas en forma aleatoria para cada tratamiento que relacionó el método de preparación del biocoagulante, pH inicial, turbidez inicial y dosis del biocoagulante. El orden de los experimentos para garantizar la aleatorización, lo generó el software Minitab y se puede observar en el anexo 9.2.

3.2.4 Recolección de datos

3.2.4.1 Recursos

Para el desarrollo de esta investigación, los equipos de laboratorio que se utilizaron fueron: equipo de jarras, turbidímetro, potenciómetro, balanza analítica, licuadora y estufa. Los materiales a emplear comprendieron los de laboratorio, muestras de agua del Estero Medina y muestras de la cactácea *Opuntia ficus-indica*. Específicamente, entre los materiales de laboratorio empleados estuvieron: pesamuestras, morteros con su mango, espátulas, cilindros graduados, vasos de precipitado, agitadores de vidrio, cajas de Petri, embudos, papel filtro, soportes, pipetas, matraces aforados con tapa, frasco lavador, agua destilada, patrones de calibración para el potenciómetro y para el turbidímetro. También se requirieron recipientes para la recolección de muestras de agua, cuchillos o peladores.

En cuanto a los materiales bibliográficos, estos se consultaron en la plataforma de Google Académico y en la Biblioteca Virtual de la Universidad Agraria del Ecuador.

Con relación a los recursos tecnológicos, se hizo uso de los programas Microsoft Word, Microsoft Power Point, Microsoft Excel y Microsoft Project. También se usó el paquete estadístico Minitab 19 para procesar los datos.

3.2.4.2 Métodos y técnicas

Los pasos seguidos para la realización de la investigación ameritaron la aplicación de métodos y técnicas específicas, las cuales se describen a continuación.

- a) *Recolección de muestras de agua del Estero Medina*. Las muestras de agua para realizar los experimentos se recolectaron al azar en diferentes puntos del Estero Medina, parroquia Bellamaría. Posteriormente, se trasladaron a los laboratorios de la Universidad Agraria del Ecuador y se caracterizaron para luego efectuar los respectivos ensayos, siguiendo el orden de experimentación arrojado por el software Minitab 19 (Anezo 9.2) y según los parámetros señalados.
- b) *Preparación del biocoagulante*. Las pencas o cladodios de la cactácea *Opuntia ficus-indica* se recolectaron en viviendas ubicadas en las zonas aledañas al Estero Medina. Se llevaron al laboratorio, se retiró su epidermis, se cortó la parte restante en láminas de aproximadamente 4 mm, las cuales se colocaron en cajas de Petri y se sometieron a un proceso de desecación en la estufa a una temperatura de 60 °C. Luego se realizó la trituración de las muestras desecadas en un molino de tornillo sin fin para reducir tamaño hasta obtener un material granulado. Finalmente, se tamizó con la ayuda de un tamiz que permitió obtener partículas inferiores a 0,05 mm y se almacenó en recipientes cerrados, lejos de la luz y a una temperatura máxima de 30 °C (Atupaña y Guacho, 2019). Para la preparación de la forma fresca, después de retirar la epidermis, se cortó en trozos y se licuó, siempre midiendo las masas para preparar el biocoagulante de acuerdo a las concentraciones

requeridas. En este último caso, el producto se utilizó el mismo día y no se almacenó.

- c) *Prueba de jarras*. La prueba de jarras facilitó la realización de las fases de coagulación, floculación y sedimentación con las diferentes dosis del biocoagulante *Opuntia ficus-indica*, tanto en forma fresca como desecada. Durante la primera fase se añadieron las diferentes dosis de coagulante y se aplicó la mezcla rápida (100 rpm durante un minuto). En la segunda fase se continuó con la mezcla lenta (30 rpm durante 20 minutos) y sedimentación (0 rpm durante 30 minutos), siguiendo lo establecido en la Norma ASTM D2035-19 (ASTM International Standards Worldwide, 2019).
- d) *Medición de parámetros fisicoquímicos*. Los métodos que se aplicaron comprendieron los siguientes: método potenciométrico para la determinación del pH y método nefelométrico que involucra la medición de la turbidez (APHA-AWWA-WEF, 2017). Para la calibración del potenciómetro se usaron patrones de medio ácido (pH=4,00) y de medio alcalino (pH=10). El electrodo del potenciómetro previamente lavado con agua destilada y secado, se introdujo en cada una de las muestras de agua y se registró el valor mostrado en el equipo. La realización de la calibración del turbidímetro también se hizo con sus respectivos patrones de formazina. Se colocó la muestra de agua en la celda y se introdujo en el equipo, luego de estabilizar el valor en la pantalla, se registró para luego procesar los datos.

Además, las muestras se filtraron y se determinó la eficiencia en la remoción de turbidez por medio de la siguiente ecuación:

$$Er (\%) = \frac{T_i - T_f}{T_i} \times 100$$

Donde:

Er (%): Eficiencia en la remoción de turbidez
 Ti: Turbidez inicial
 Tf: Turbidez final

3.2.5 Análisis estadístico

Mediante el software Minitab 19 se realizó el diseño factorial con cuatro (4) factores o variables y dos (2) niveles. Los datos referidos a los factores se cargaron en el software y se obtuvo el diseño factorial. Después de los experimentos, se adicionaron los datos obtenidos para la turbidez residual.

En este estudio se realizaron dos réplicas y se efectuó un análisis estadístico inferencial por medio del método de factores para identificar los factores con mayor efecto en la turbidez y las interacciones entre estos. Se determinaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, para saber si se acepta la hipótesis nula (H_0). Al satisfacer estos supuestos, se continuó con el análisis del diseño experimental para luego explicar los resultados del análisis de la varianza (ANOVA). Tal como se puede visualizar en la Tabla 6.

Tabla 6. Fuentes de variación y demás componentes de análisis de varianza (ANOVA)

Fuente de variaciones	Grados de libertad
Total (n-1)	15
Tratamientos (t-1)	1
Error experimental (n t)	15

Análisis para establecer diferencias significativas entre los tratamientos.
 Ruíz, 2021

4. Resultados

4.1 Caracterización de pH, turbidez inicial y SST de las aguas del Estero

Medina mediante ensayos de laboratorio.

Las muestras de agua recolectadas en el Estero Medina de la parroquia Bellamaría en el cantón Santa Rosa de la provincia El Oro, presentan determinadas características fisicoquímicas. En la figura 1 se puede observar el comportamiento del parámetro pH.

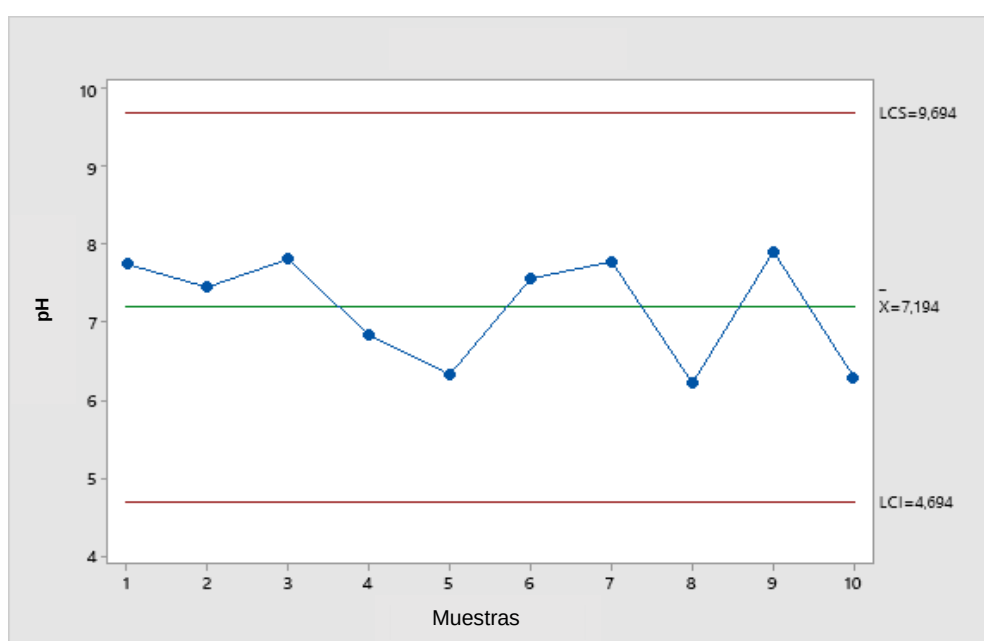


Figura 1. Valores de pH en muestras de agua del Estero Medina

Se observa un valor de pH mínimo correspondiente a 6,22 y un valor máximo equivalente a 7,81 unidades. La media aritmética se ubica en 7,194 unidades.

Los valores de las mediciones realizadas para la turbidez se representan en la figura 2.

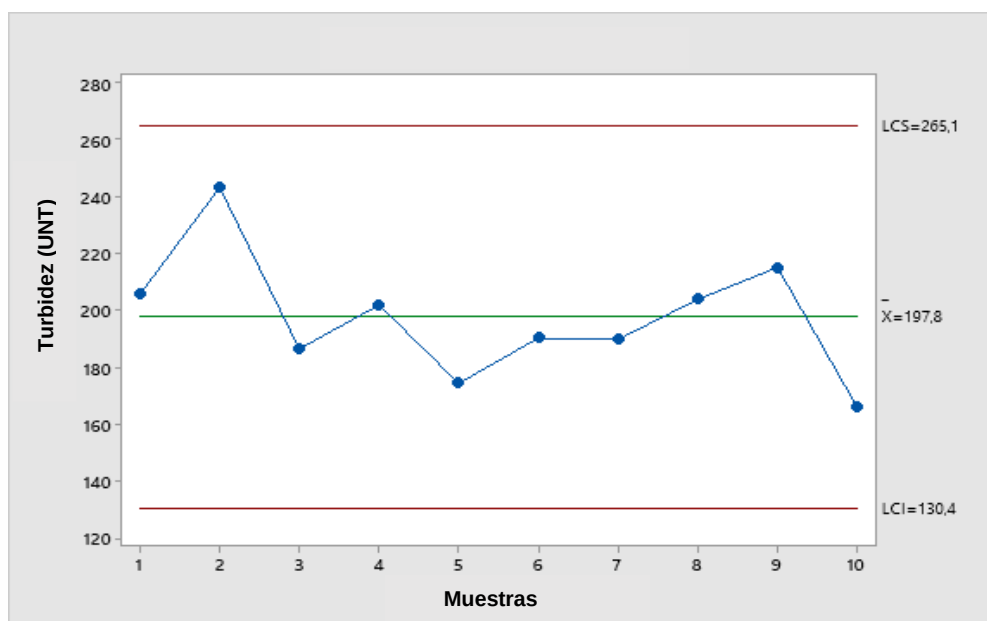


Figura 2. Valores de turbidez en muestras de agua del Estero Medina

La caracterización de las aguas del Estero Medina con respecto al parámetro turbidez, muestra valores que fluctúan entre 166,1 UNT y 243,2 UNT, como límites mínimo y máximo registrados, alcanzando un promedio de 197,8 UNT.

En la figura 3 se visualizan los valores correspondientes a las mediciones efectuadas para los sólidos suspendidos totales.

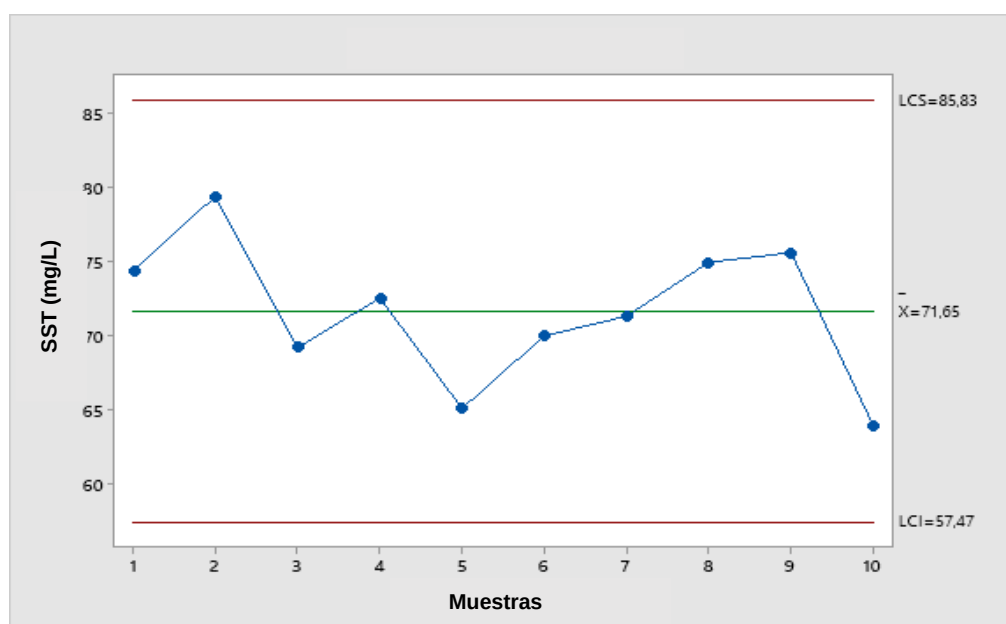


Figura 3. Valores de sólidos suspendidos totales en muestras de agua del Estero Medina

Con respecto al parámetro sólidos suspendidos totales, se registran valores que oscilan entre 63,97 mg/L y 79,37 mg/L, con una media aritmética de 71,65 mg/L.

4.2 Comportamiento de la turbidez y el pH en las aguas del Estero

Medina tratadas con el mucílago del biocoagulante *Opuntia ficus-indica* en forma fresca y desecada mediante análisis estadístico.

Para efectuar el análisis factorial se elabora inicialmente el diseño factorial (Anexo 9.2) y luego el análisis propiamente dicho, previo el cumplimiento de algunos supuestos. Uno de los supuestos que se deben cumplir es el de Normalidad. Para establecer si los datos obtenidos de las dos réplicas siguen una distribución normal, se plantearon las siguientes hipótesis:

H_0 = Los datos siguen una distribución normal

H_1 = Los datos no siguen una distribución normal

Se efectuaron dos pruebas para la normalidad, una que se recomienda para el análisis factorial y la prueba específica de Kolmogorov-Smirnov. En la figura 4 se observan los resultados para la primera prueba de normalidad.

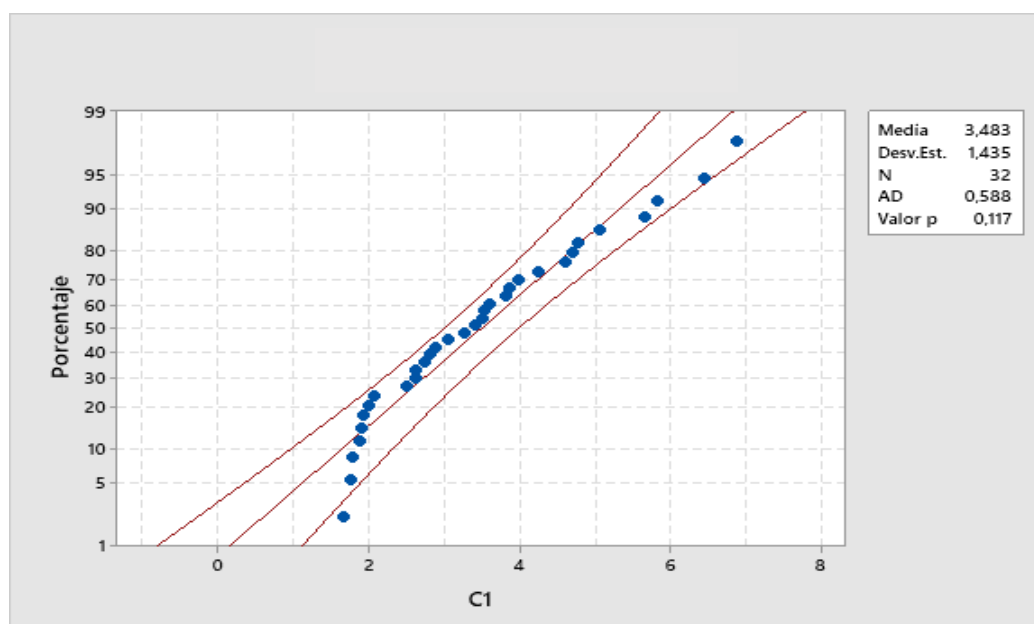


Figura 4. Prueba de normalidad obtenida mediante el software Minitab 19

La primera prueba de normalidad presenta un $p \geq 0,05$, se acepta la hipótesis nula, de modo que, los datos siguen una distribución normal. En la figura 5 se muestran los resultados de la prueba específica de normalidad.

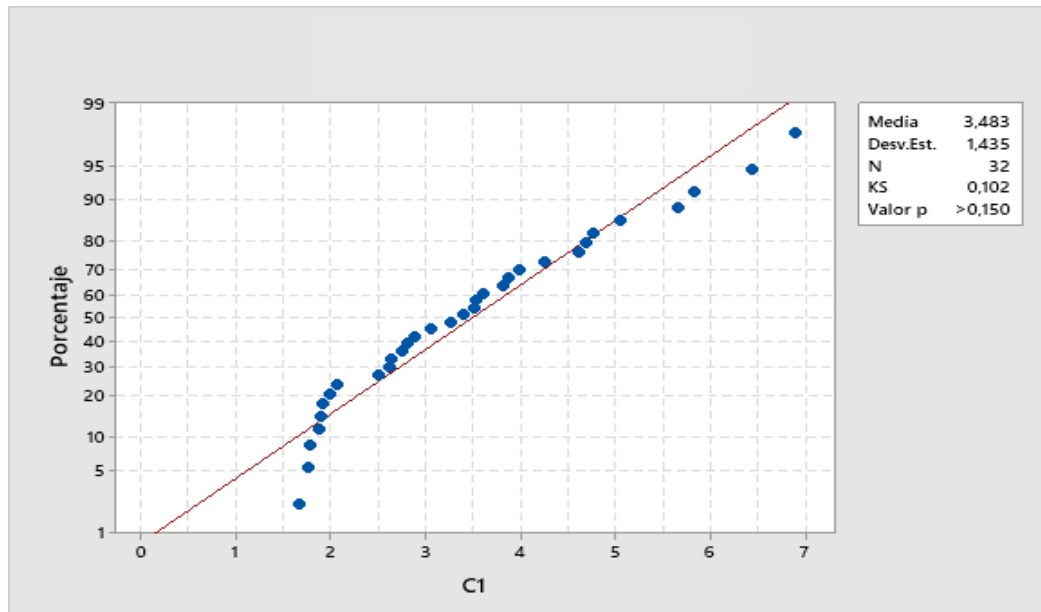


Figura 5. Prueba de Normalidad Kolmogorov-Smirnov obtenida mediante el software Minitab 19

Del mismo modo, al efectuar la prueba de Kolmogorov-Smirnov, se obtiene un valor de $p > 0,150$, el cual implica que $p \geq 0,05$ y, por tanto, se acepta la hipótesis nula, relativa a que no hay diferencias significativas entre los datos.

En relación a la prueba de homocedasticidad u homogeneidad de varianzas, se plantean las hipótesis siguientes:

H_0 = Todas las varianzas son iguales

H_1 = Por lo menos una varianza es diferente

Se aplica el método de Bartlett, el cual es exacto solo para datos normales (supuesto cumplido). En la figura 6 se observan los resultados de la prueba de homogeneidad.

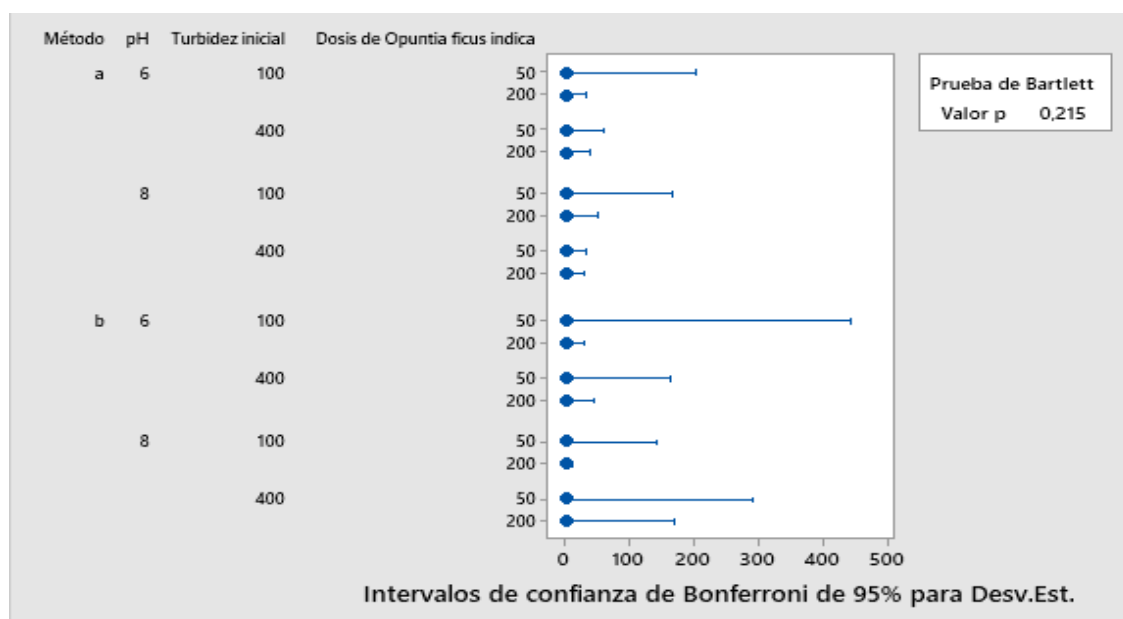


Figura 6. Prueba de homocedasticidad mediante el software Minitab 19

Con la prueba de Bartlett se obtiene un valor de $p = 0,215$ que implica $p \geq 0,05$ y, por tanto, se acepta la H_0 , relativa a que no hay diferencias significativas entre los datos, la cual representa la dispersión de los residuales, de manera que, los datos no presentan ninguna tendencia extraña o algún patrón de distribución. Con base a lo señalado, se puede afirmar que los datos cumplen con el supuesto de homocedasticidad.

En función de las pruebas realizadas, se confirmaron los supuestos de normalidad y de homocedasticidad.

Después de verificar los supuestos, se procede al análisis de los experimentos y los resultados del análisis de varianza se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Análisis de varianza (ANOVA)

Factor	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor p
A: Método	1,3778	1,3778	13,07	0,002
B: Ph	0,7875	0,7875	7,47	0,015
C: Turbidez inicial	15,7922	15,7922	149,75	0,000
D: Dosis de <i>O. ficus indica</i>	37,4113	37,4113	354,76	0,000
AB	0,0528	0,0528	0,50	0,489
AC	0,0144	0,0144	0,14	0,716

AD	0,0760	0,0760	0,72	0,408
BC	0,2016	0,2016	1,91	0,186
BD	3,0876	3,0876	29,28	0,000
CD	0,9112	0,9112	8,64	0,010
ABC	0,0021	0,0021	0,02	0,889
ABD	0,2415	0,2415	2,29	0,150
ACD	0,0722	0,0722	0,68	0,420
BCD	1,7391	1,7391	16,49	0,001
ABCD	0,3916	0,3916	3,71	0,072
Error	1,6873	0,1055		
Total	63,8464			

Ruiz, 2021

Los gráficos que arroja el análisis factorial son un gráfico normal y uno de Pareto.

En la figura 7 se muestran los efectos que corresponden a la gráfica normal.

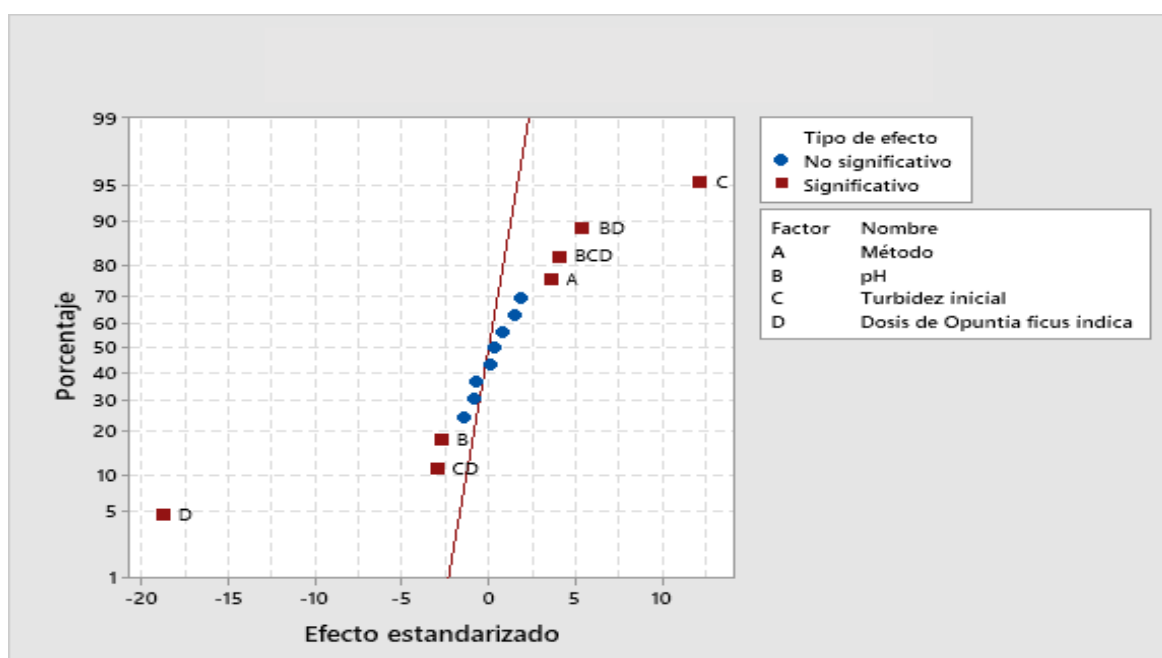


Figura 7. Gráfica normal de efectos estandarizados (la respuesta es Turbidez final $\alpha = 0,05$), mediante el software Minitab 19

La gráfica normal muestra los tipos de efectos que se pueden producir. Así, los puntos azules indican los efectos no significativos y los cuadrados rojos corresponden a los efectos significativos.

En el caso del estudio presente, aparecen algunos factores repetidos en diferentes sitios, pero se consideran relevantes aquellas interacciones en las cuales un factor acompaña a otro u otros.

En la figura 8 se muestra el diagrama de Pareto para efectos estandarizados.

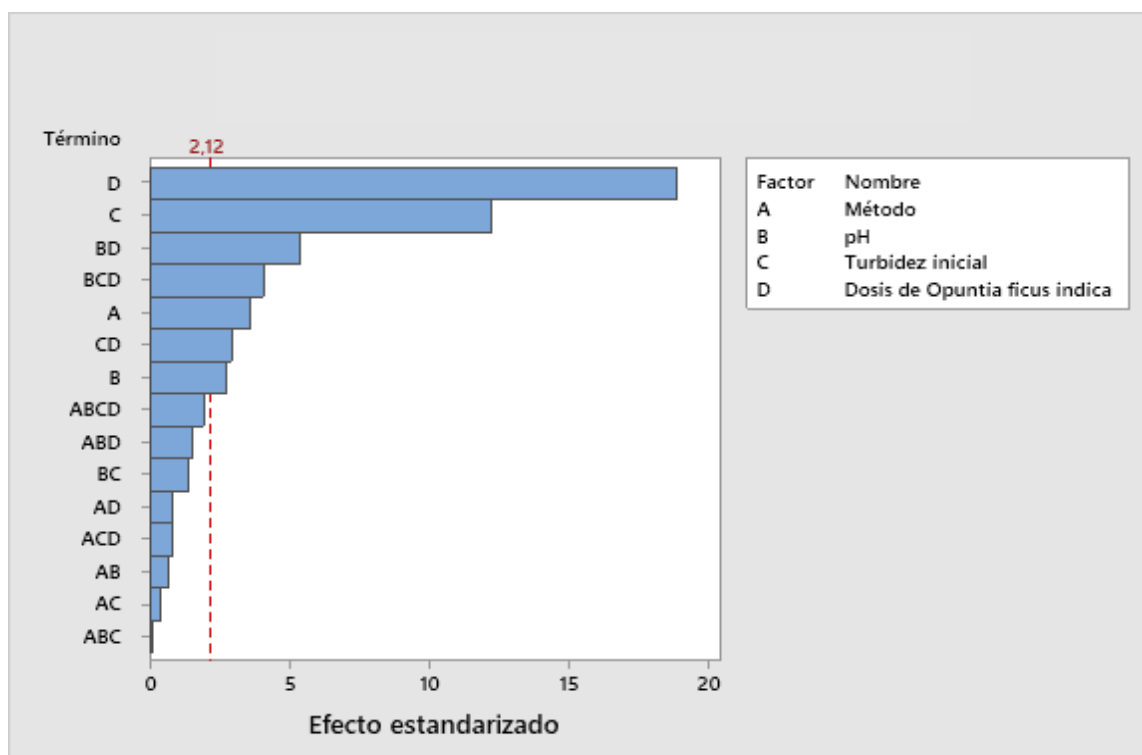


Figura 8. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (la respuesta es Turbidez final $\alpha = 0,05$), mediante el software Minitab 19

El diagrama de Pareto permite visualizar los efectos significativos y la relevancia de cada uno de estos. En este sentido, se observa que los efectos que sobrepasan la línea roja son los más significativos. Así, de los efectos seleccionados en la gráfica anterior, se puede afirmar que el efecto del método con respecto a la interacción pH, turbidez inicial y dosis de *O. ficus indica*, es menos significativo, por tanto, el efecto más significativo para la reducción de la turbidez es producto de la interacción entre los tres factores señalados.

Otras gráficas que permiten analizar las interacciones son la gráfica de efectos principales, la gráfica de interacción para Y (variable turbidez final) y el gráfico de cubos.

En la figura 9 se muestra la gráfica de efectos principales para la turbidez final.

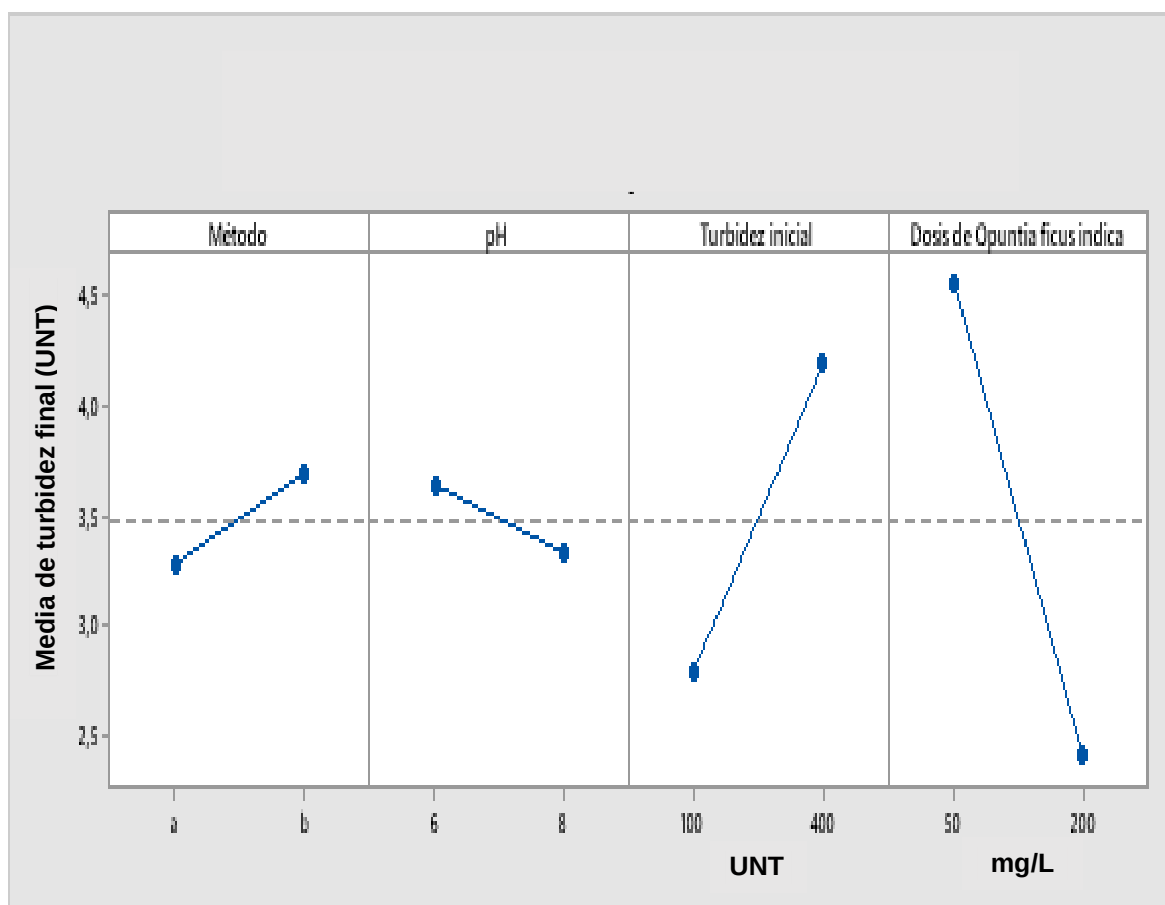


Figura 9. Gráfica de efectos principales para Turbidez final, mediante el software Minitab 19

En cuanto a los efectos principales, se observa que, con relación al método empleado para utilizar el coagulante, la forma cruda permite obtener un menor valor de turbidez; con relación al parámetro pH, un valor de 8 unidades refleja un nivel inferior de turbidez; en correspondencia con la turbidez inicial, resultó más efectiva para la remoción de turbidez el nivel inferior de 100 UNT; y, en cuanto a la dosis de *O. ficus indica*, el nivel más eficiente fue el de 200 mg/L, con el cual se obtuvo el menor valor de turbidez final. En resumen, los factores asociados a la obtención del menor valor de turbidez final, son: método (a), pH (8), T_o (100 UNT) y 200 mg/L (dosis).

En la tabla 8 se indica el orden de influencia de las interacciones binarias sobre la turbidez final, el cual se establece a partir de los valores correspondientes a los cuadrados medios.

Tabla 8. Orden de importancia de las interacciones binarias

Interacción	Valor de cuadrado medio
BD 1	3,0876
CD 2	0,9112
BC 3	0,2016
AD 4	0,0760
AB 5	0,0528
AC 6	0,0144

Ruiz, 2021

En la figura 10 se muestra la interacción de los diversos factores considerados para el análisis factorial: método, pH, dosis de *O. ficus* y turbidez inicial.

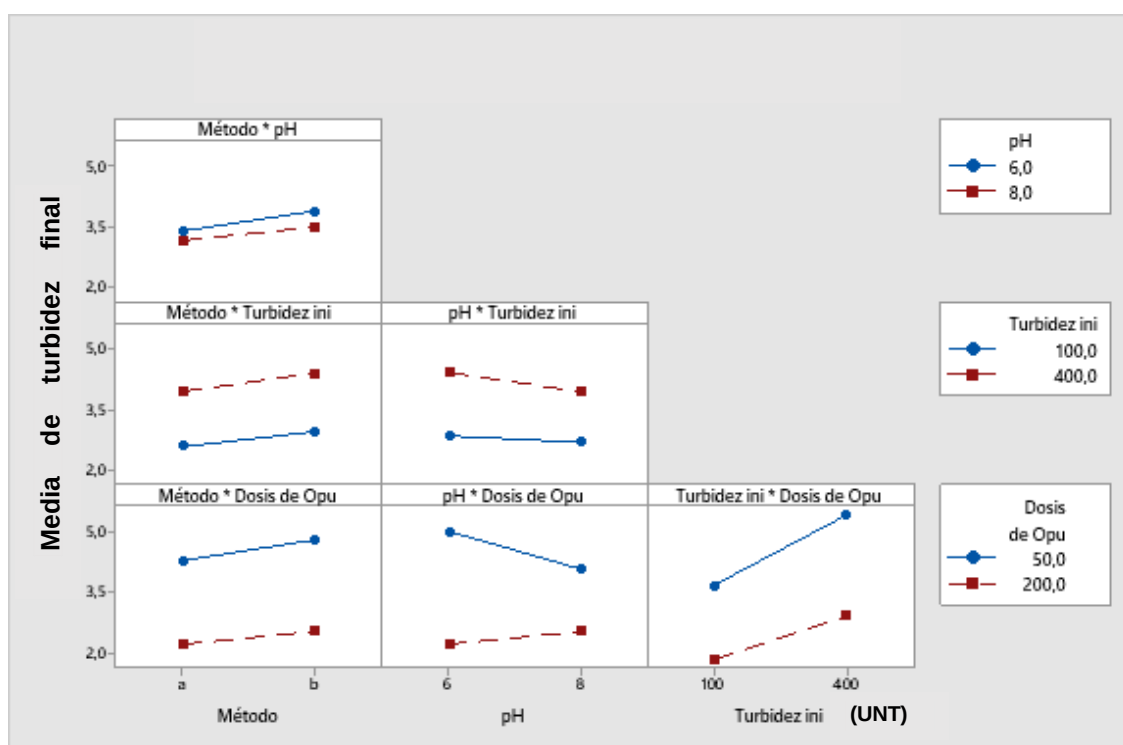


Figura 10. Gráfica de interacción para Turbidez final

De acuerdo a esta gráfica de interacción de dos factores, se puede afirmar lo siguiente para cada interacción:

-Interacción AB: *El gráfico que relaciona el método con el pH* permite deducir que el menor valor de turbidez final se alcanza con el método de preparación del coagulante en forma cruda (a) y como pH óptimo el valor igual a 8 (nivel máximo).

-Interacción AC: *El gráfico que relaciona el método con la turbidez inicial* permite lograr el valor más bajo de turbidez final cuando se emplea el método con el coagulante en forma cruda (a) y la turbidez inicial corresponde al nivel inferior (100 UNT).

-Interacción AD: *El gráfico que relaciona el método con la dosis de Opuntia ficus indica* permite obtener el valor óptimo de turbidez cuando se aplica el método de obtención del coagulante en forma cruda y el nivel máximo de la dosis de *O. ficus indica* (200 mg/L).

-Interacción BC: *El gráfico que relaciona el pH con la turbidez inicial* refleja que el mejor valor de turbidez se registra cuando el pH corresponde al valor máximo (8) y la turbidez inicial se sitúa en el nivel inferior (100 UNT).

-Interacción CD: *El gráfico que relaciona la turbidez inicial con la dosis de Opuntia ficus indica* permite distinguir que la menor turbidez final se logra cuando el valor de turbidez inicial se encuentra en el valor inferior (100 UNT) y la dosis en el valor máximo (200 mg/L).

-Interacción BD: *El gráfico que relaciona el pH con la dosis de Opuntia ficus indica* permite visualizar que, el valor más bajo de turbidez final se alcanza cuando el pH presenta el valor mínimo (6) y la dosis se ubica en el nivel más alto (200 mg/L).

En la figura 11 se presenta la gráfica de cubos, la cual refleja las condiciones óptimas de interacción de los factores en estudio con respecto a la turbidez final.

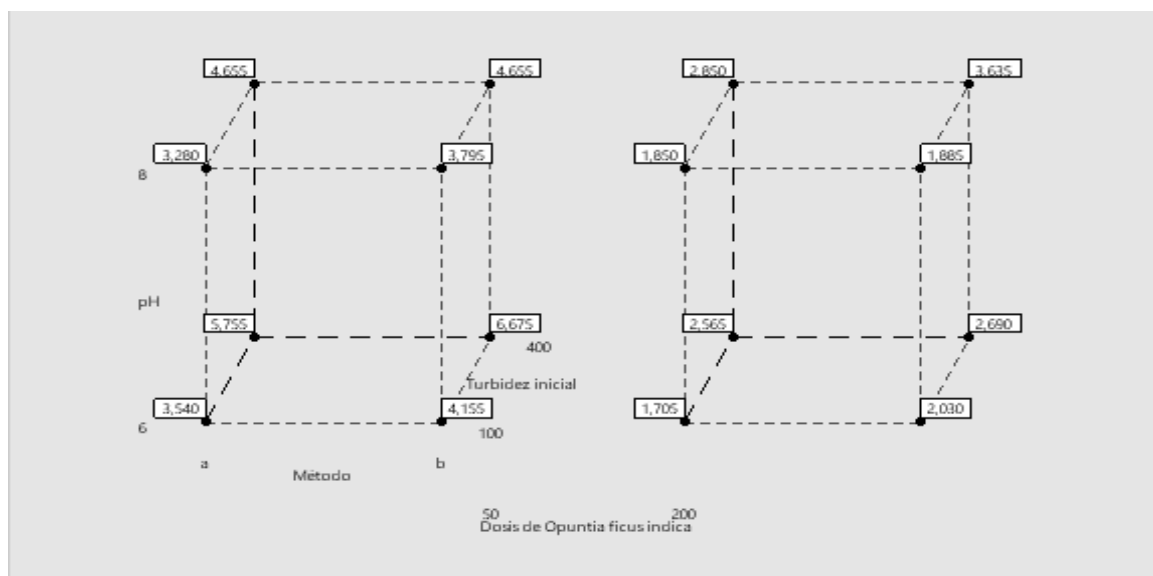


Figura 11. Gráfica de cubos para Turbidez final

De acuerdo a la gráfica de cubos y según los datos de turbidez final, los dos cubos representan todas las combinaciones de los valores de configuración de las variables o factores experimentales para los cuatro factores (método, pH, turbidez inicial y dosis de *O. ficus indica*), así como la media ajustada correspondiente a cada combinación. El cubo que se encuentra del lado izquierdo contiene las medias de los valores de turbidez final cuando la dosis de *O. ficus indica* es igual a 50 mg/L. De manera similar, el cubo que se ubica en el lado derecho muestra los valores para la dosis de 200 mg/L del coagulante.

Se observa que, el valor menor de la media ajustada para la turbidez final (1,705 UNT), se obtiene con la siguiente combinación de factores óptimos:

- Dosis de *O. ficus indica*: 200 mg/L
- pH= 6
- Método: a (mucílago fresco)
- To= 100 UNT

4.3 Parámetros fisicoquímicos en las aguas del Estero Medina tratadas con *Opuntia ficus-indica* mediante la comparación con las normas de calidad de agua vigentes.

En la figura 12 se puede observar el comportamiento de la turbidez en aguas del Estero Medina, tratadas con 200 mg/L del mucílago de *O. ficus indica*, en forma fresca y desecada. Con el coagulante en forma cruda se obtienen valores de turbidez que varían entre 1,37 y 2,6 UNT, los cuales evidencian una alta remoción de turbidez que corresponde a 99,18 % y 98,73 %, respectivamente; demostrando la alta eficiencia del coagulante al emplear el mucílago fresco o crudo.

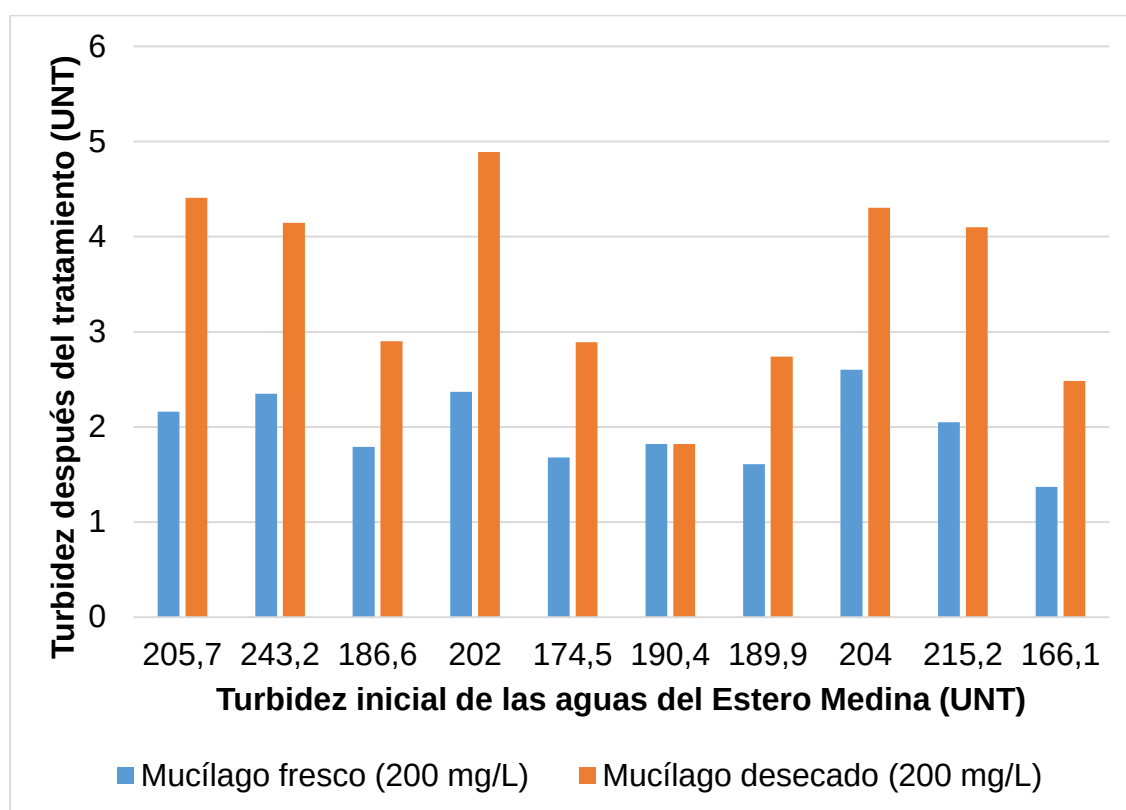


Figura 12. Comportamiento de la turbidez en aguas del Estero Medina tratadas con *O. ficus indica* a una dosis de 200 mg/L

Por otra parte, al emplear el mucílago en forma desecada, se registran valores de turbidez que oscilan desde 1,82 UNT hasta 4,89 UNT y valores de remoción que corresponden a 99,04 % y 97,58 %, respectivamente; reflejando igualmente una alta remoción de la turbidez. Sin embargo, en este caso los valores de turbidez son un poco más elevados que los obtenidos con el mucílago fresco al aplicar esta dosis.

En la Tabla 9 se indican los porcentajes correspondientes a la remoción de turbidez.

Tabla 9. Porcentajes de remoción de turbidez una vez culminado el tratamiento.

To (UNT)	Método	% Remoción	
		Dosis de 50 mg/L	Dosis de 200 mg/L
205,7	Fresco	98,42	98,95
	Desecado	97,46	97,86
243,2	Fresco	98,56	99,03
	Desecado	97,9	98,30
186,6	Fresco	98,52	99,04
	Desecado	97,85	98,45
202	Fresco	98,99	98,83
	Desecado	97,11	97,58
174,5	Fresco	98,36	99,04
	Desecado	97,83	98,34
190,4	Fresco	98,47	99,04
	Desecado	98,56	99,04
189,9	Fresco	98,66	99,15
	Desecado	97,96	98,56
204	Fresco	98,23	98,73
	Desecado	97,37	97,89
215,2	Fresco	98,55	99,05
	Desecado	97,54	98,09
166,1	Fresco	98,65	99,18
	Desecado	98,01	98,50

Ruiz, 2021

Con respecto a los Sólidos Suspendidos Totales (SST), al aplicar la dosis de 200 mg/L, se puede visualizar su comportamiento en la figura 13.

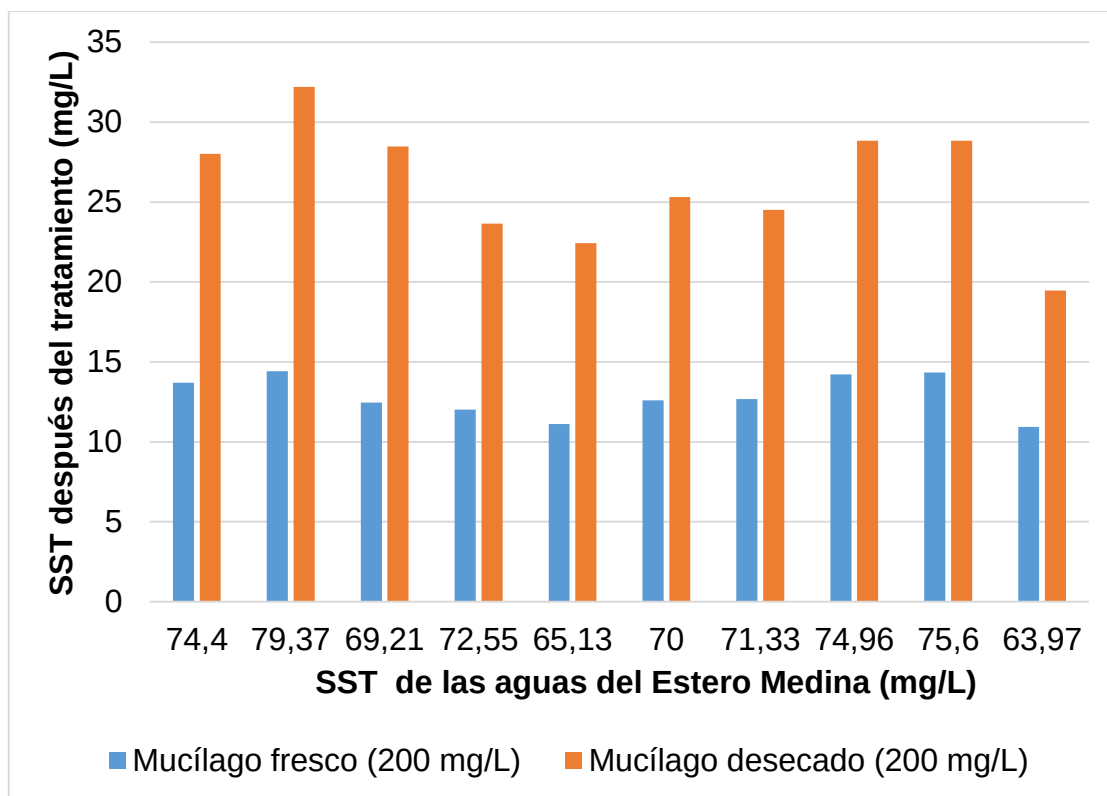


Figura 13. Comportamiento de los SST en aguas del Estero Medina tratadas con *O. ficus indica* a una dosis de 200 mg/L

Al aplicar los 200 mg/L del coagulante fresco preparado a partir de la cactácea *O. ficus indica*, se encuentran valores de SST que fluctúan entre 10,93 y 14,43 mg/L, lo cual demuestra la reducción que se produce de este parámetro, ya que, inicialmente los valores se ubicaban en 63,97 mg/L y 79,37 mg/L, respectivamente.

Así mismo, con el tratamiento de las aguas del Estero Medina mediante el mucílago desecado de *O. ficus indica*, también se produce una reducción de este parámetro hasta un rango de 19,47 a 28,85 mg/L; pero, la misma no es tan alta como cuando se aplica el mucílago fresco.

El estudio del comportamiento de la turbidez en las aguas del Estero Medina cuando se aplica la dosis de 50 mg/L del mucílago crudo y desecado, se observa que, la forma fresca permite alcanzar valores de turbidez entre 2,25 y 3,61 UNT, con remociones de 98,65 % y 98,23 %, respectivamente. Estos valores son

similares, pero ligeramente inferiores a los que se indican para la dosis de 200 mg/L del coagulante crudo.

En la figura 14 se muestra el comportamiento de la turbidez a la dosis de 50 mg/L.

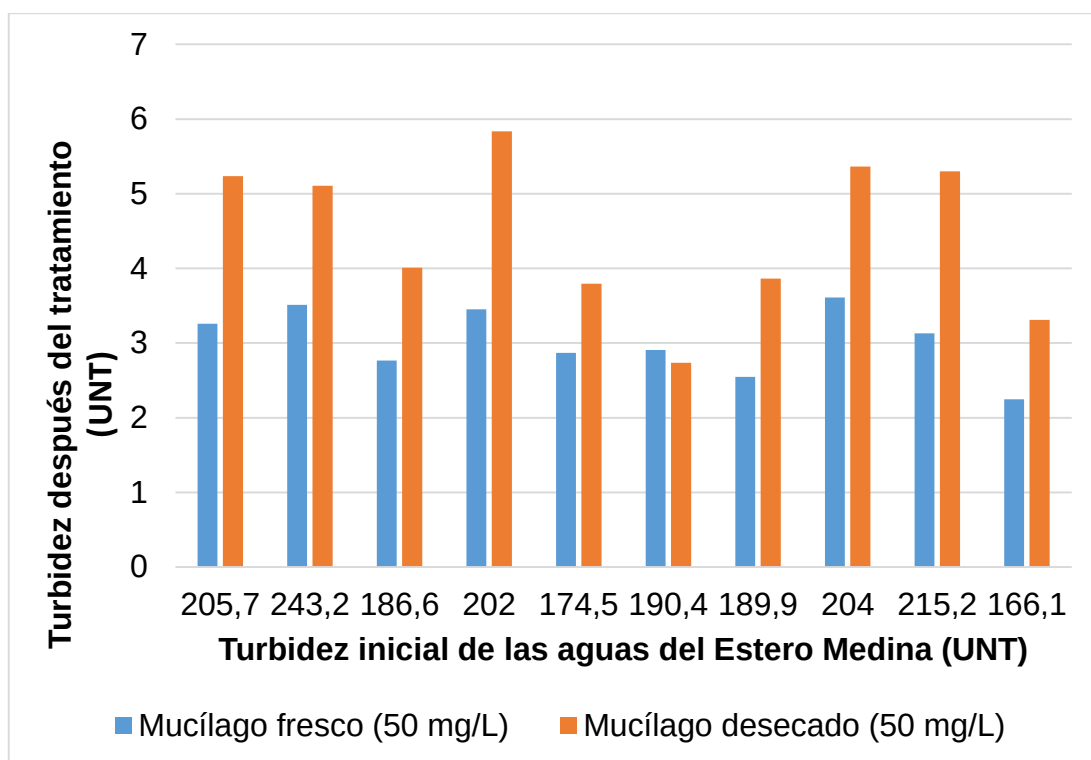


Figura 14. Comportamiento de la turbidez en aguas del Estero Medina tratadas con *O. ficus indica* a una dosis de 50 mg/L

En cuanto al tratamiento con la forma desecada, se obtienen turbiedades desde 2,735 hasta 5,835 UNT, relacionados con porcentajes de remoción iguales a 98,56 % y 97,12 %, respectivamente. Estos resultados permiten inferir que, la eficiencia en la remoción de turbidez es menor cuando se aplica la mezcla coagulante *O. ficus indica* en forma desecada, tanto para esta dosis como para la dosis de 200 mg/L.

El comportamiento de los SST con la dosis de 50 mg/L del coagulante *O. ficus indica* se puede observar en la figura 15.

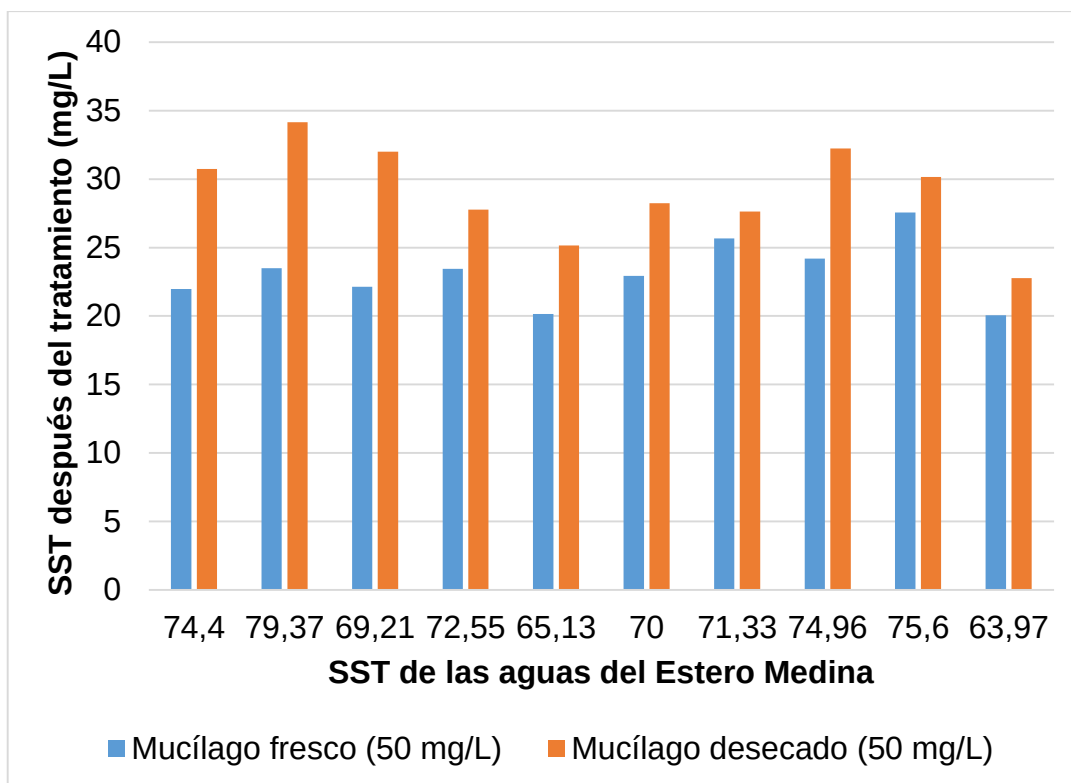


Figura 15. Comportamiento de los SST en aguas del Estero Medina tratadas con *O. ficus indica* a una dosis de 50 mg/L

En general, el mucílago fresco muestra mayor reducción de los SST, hallándose valores que se sitúan entre 20,07 y 27,58 mg/L, correspondiendo de manera respectiva a valores de 63,97 y 75,6 mg/L, previos al tratamiento.

Con relación a la aplicación en forma desecada de este coagulante para tratar las aguas del Estero Medina, del mismo modo se registra la reducción de este parámetro a valores que se encuentran entre 27,77 y 34,15 mg/L a partir de valores iniciales de 63,97 y 79,37 mg/L, respectivamente. No obstante, estos valores son superiores con respecto a los alcanzados con la mezcla fresca del biocoagulante y, además, se ubican por encima de los valores alcanzados con el coagulante *O. ficus indica*, tanto fresco como desecado, al utilizar una dosis de 200 mg/L.

En la figura 16 se puede observar el comportamiento del pH en las aguas tratadas con 200 mg/L, tanto para el mucílago fresco como para el desecado.

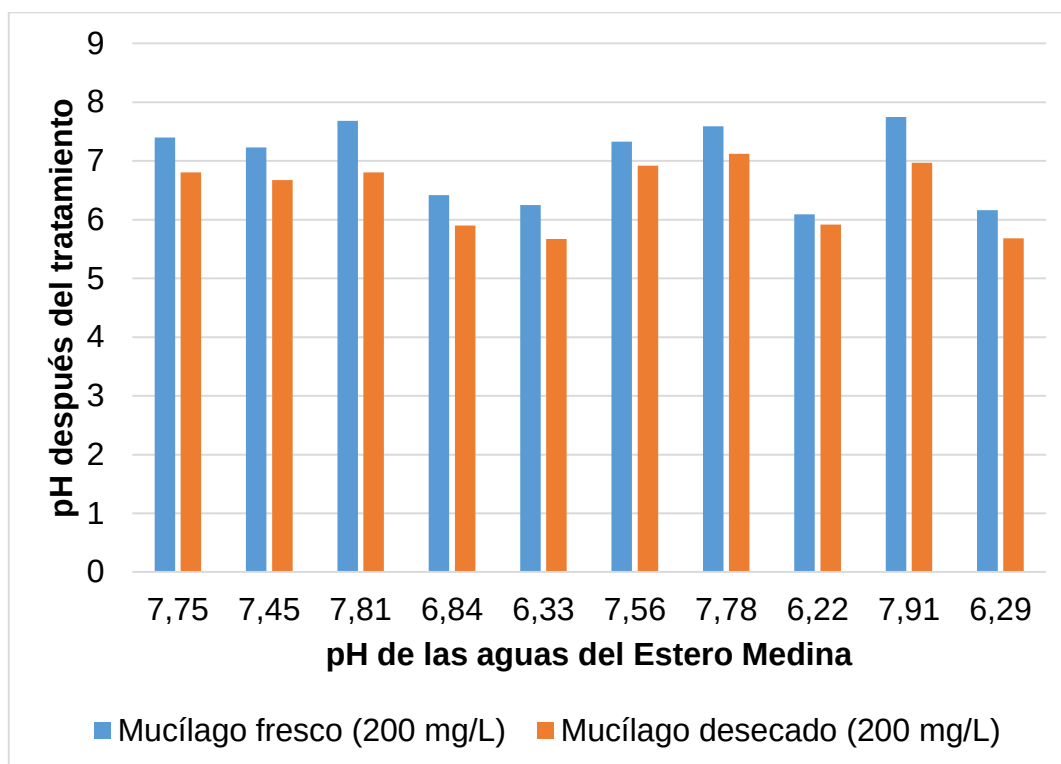


Figura 16. Comportamiento del pH en aguas del Estero Medina tratadas con *O. ficus indica* a una dosis de 200 mg/L

Para el parámetro pH con la dosis de 200 mg/L del coagulante *O. ficus indica* en forma fresca, se puede observar que, el pH fluctúa entre 6,09 y 7,75 unidades, situándose en niveles inferiores a los valores iniciales de 6,22 y 7,91, respectivamente. Esto parece indicar que la adición del biocoagulante acidifica ligeramente el pH.

Al emplear la misma dosis, pero con el biocoagulante en forma desecada, se alcanzan valores que oscilan desde 5,67 a 7,12 unidades, correspondientes a niveles con pH inicial de 6,33 y 7,78, respectivamente. En este caso, igualmente se registra una ligera acidificación del agua.

La evaluación del pH al aplicar la dosis de 50 mg/L del biocoagulante se muestra en la figura 17.

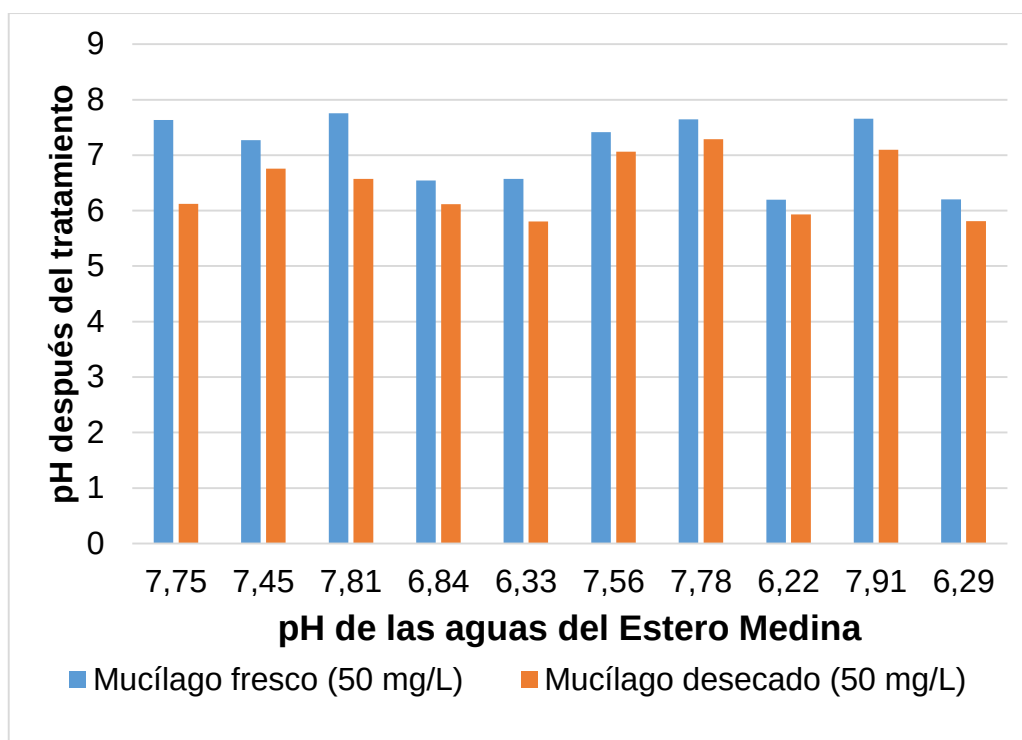


Figura 17. Comportamiento del pH en aguas del Estero Medina tratadas con *O. ficus indica* a una dosis de 50 mg/L

Se puede observar que, las aguas tratadas con el mucílago fresco reflejan un rango de pH que fluctúa entre 6,2 y 7,76, valores que corresponden a pH inicial de 6,22 y 7,81, respectivamente. Igualmente, se produce una leve reducción del pH.

Cuando se emplea la misma dosis, pero del biocoagulante *O. ficus indica* en forma desecada, el intervalo de pH se ubica entre 5,805 y 7,29 unidades, valores que corresponden a 6,33 y 7,78, respectivamente, registrados inicialmente. Estos resultados también demuestran la acidificación del agua producto de la adición del biocoagulante, observándose que, el mayor efecto se produce cuando se adiciona la mezcla del biocoagulante en forma desecada.

En resumen, a una dosis de 200 mg/L, con la adición del mucílago crudo a las muestras de agua, se registran valores promedio de 1,98 UNT (turbidez), 12,85 mg/L (SST) y 6,99 (pH); y al aplicarle el mucílago desecado los valores de los parámetros se ubican en 3,47 UNT (turbidez), 26,18 mg/L (SST) y 6,45 (pH). Al

emplear la dosis de 50 mg/L, las aguas tratadas con el mucílago crudo muestran valores de 3,03 UNT (turbidez), 23,16 mg/L (SST) y 7,09 (pH); mientras que, al agregar el mucílago desecado, se obtienen valores de 4,46 UNT (turbidez), 29,09 mg/L (SST) y 6,46 (pH).

En concordancia con los resultados obtenidos, se observa el cumplimiento de la normativa establecida (Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador, 2015) para el pH y la turbidez (no se contemplan los SST), de conformidad con la cual, la turbidez máxima es igual a 5 UNT y el pH se debe ubicar en un intervalo entre 6 y 9.

5. Discusión

Las aguas del Estero Medina presentan valores de pH que a un nivel mínimo se ubicaron en 6,22 (ligeramente ácido) y a un nivel máximo presentaron un pH de 7,81 (básico o alcalino). En cuanto a los valores de turbidez, se registró un valor mínimo de 166,1 UNT y un valor máximo de 243,2 UNT, que demuestra una alta turbidez, lo cual no la hace apta para el consumo humano, ya que supera el máximo establecido de 5 UNT. Con respecto a los sólidos suspendidos totales, se alcanzó un nivel mínimo de 63,97 mg/L y un máximo de 79,37 mg/L, evidenciando junto a la turbidez, la necesidad de un tratamiento para que resulte apta para el consumo humano. En promedio, las características de los parámetros fisicoquímicos que presentan las aguas de este estero, son: pH (7,194), turbidez (197,8 UNT) y SST (71,65 mg/L).

Los resultados de las características fisicoquímicas de las aguas del Estero Medina son similares a las reportadas por Rodríguez-Villacis et al. (2017), pues cuando efectuaron la caracterización del Estero Salado, indicaron un promedio para el pH igual a 7,33 y para la turbidez, una media de 171,05 UNT. Por otra parte, en cuanto a los SST, los resultados son inferiores a los citados por Mariscal-Santi et al. (2018), quienes refieren valores para este parámetro que se ubican en un promedio de 116,38 mg/L.

Después de conocer los resultados del tratamiento de las aguas del Estero Medina, se pudo evidenciar la efectividad de la cactácea *Opuntia ficus indica*, tanto en forma fresca como desecada, al aplicar el análisis factorial.

En la prueba de homogeneidad (prueba de Bartlett) el valor fue $p \geq 0,05$, por lo que se aceptó la hipótesis nula, tampoco se observaron diferencias significativas y

se cumplió el supuesto de homogeneidad u homocedasticidad, evidenciando que no hay tendencias extrañas en la distribución de los datos.

Estos resultados sobre los efectos principales, presentan discrepancias con respecto a lo evidenciado por Trujillo et al. (2014), quienes indican que el pH más bajo (5) y la dosis mínima (50-50 % de sulfato de aluminio/almidón de plátano) estuvieron entre los efectos principales durante el estudio que realizaron. Si bien, un pH bajo puede favorecer la remoción de turbidez en el caso de los almidones y el sulfato de aluminio, tal y como lo exponen los autores, es posible que las cactáceas no exhiban ese mismo comportamiento, porque, según Choque-Quispe, Choque-Quispe, Solano-Reynoso y Ramos-Pacheco (2018), la aplicación de *O. ficus indica* muestra un ligero incremento del pH desde 6,61 hasta 7,33. Es importante señalar que en este análisis se está considerando al pH como un factor aislado, pero en el presente estudio ocurren varias interacciones donde el pH incide en otras variables y, de manera simultánea inciden en la remoción de turbidez.

La efectividad del biocoagulante derivado de *O. ficus indica* en forma cruda para el tratamiento de aguas, se confirma con el estudio de Miñano et al. (2012), quienes al utilizar una dosis alta (350 mg/L) del floculante natural de *Opuntia ficus-indica* en la clarificación de las aguas superficiales de las acequias del poblado de Miraflores (Perú), evidenciaron un valor turbidimétrico de 0,11 UNT. También se encuentran coincidencias con la investigación de (Atupaña y Guacho, 2019), quienes refirieron la remoción de turbidez en aguas del río Bulubulu (Ecuador) hasta un porcentaje máximo de 96,21 % vinculado a una turbidez de 1,80 UNT. Igualmente, Villanueva (2019) refiere porcentajes de remoción con esta cactácea que oscilan entre 89 y 91 % cuando aplicó una dosis de 1250 mg/L.

La mejor interacción binaria que se obtiene en este estudio es la interacción BD, que relaciona el pH con la dosis de *O. ficus indica*, involucrando el pH, del mismo modo que lo reporta Trujillo et al. (2014) cuando estudia un biocoagulante de plátano, asociando el pH con la velocidad de mezcla lenta. Sin embargo, para este autor, la interacción específica pH/dosis no presenta efectos significativos de acuerdo al diagrama de Pareto al igual que lo refieren Pérez y López-Gonzales (2017), quienes indican que no hay efectos significativos para la interacción binaria correspondiente al pH/dosis cuando emplearon la goma de tara.

La interacción de todos los factores que se contemplan en este trabajo, permite establecer, según el gráfico de cubos, que las condiciones óptimas para efectuar el tratamiento de las aguas del Estero Medina son: Método (fresco), pH (6), Turbidez inicial (100 UNT) y dosis de *O. ficus indica* (200 mg/L). Estos resultados demuestran que el pH que mejor influye en la reducción de la turbidez es el pH más ácido (6), de tal modo que, con estas condiciones, el valor promedio de turbidez mínimo que se obtiene es 1,705 UNT. La eficiencia de este coagulante con el método fresco o crudo es mayor con respecto al desecado, lo cual se confirma con los estudios reportados por González, Fuentes, Mendoza y Caldera (2015), quienes al utilizar la cactácea *O. ficus-indica* evidenciaron porcentajes de remoción de turbidez entre 93,78 % y 96,02 % al aplicarla como mucílago fresco, y entre 82,98 % y 93,66 % al emplearla en forma desecada. Adicionalmente, afirmaron que la mayor eficiencia la obtuvieron para valores de turbidez inicial de 100 a 200 UNT con la aplicación de dosis de 350 y 450 mg/L, mostrando condiciones similares a las del presente estudio.

La acidificación del agua producto de la adición del biocoagulante en estudio, coincide con lo reportado por Olivero, Aguas, Mercado, Casas y Montes (2014),

quienes al aplicar el mucilago extraído de la tuna *Opuntia ficus indica* como coagulante en forma desecada a aguas con turbiedad inicial de 174 UNT, encontraron una reducción del pH desde 6,55 a 6,22. De la misma manera, López (2018) también indicó la reducción del pH al aplicar este mismo coagulante en forma desecada a muestras de agua con turbiedad inicial de 100 UNT, obteniendo fluctuaciones del pH inicial desde 7,24, 7 y 9 hasta 6,85, 6,86 y 8,88, respectivamente. También acotó que, en su estudio, el coagulante mostró mayor eficiencia a pH igual a 9, valor similar al óptimo encontrado en la presente investigación como un factor principal e independiente, mas no como un factor de interacción con otros, porque en este último caso resultó un pH igual a 6.

Con relación al cumplimiento de los parámetros analizados en las aguas del Estero Medina, el Acuerdo Ministerial N° 028 es la normativa vigente que detalla los criterios de calidad de fuentes de agua para consumo humano y doméstico y que para su potabilización solo requieren desinfección. En este acuerdo se especifican niveles permisibles para el pH en un intervalo entre 6-9 y para la turbiedad se indica un límite de 5 UNT (Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador, 2015).

De acuerdo a lo estipulado en el Acuerdo Ministerial N° 028 (Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador, 2015), se puede afirmar que las aguas del Estero Medina tratadas con *Opuntia ficus indica*, tanto en forma cruda como desecada, se ajustan a la normativa establecida, exceptuando los SST, porque no están en la normativa. Igualmente, el análisis factorial de los diferentes tratamientos considerados, permitió obtener unas condiciones óptimas que también cumplen con los niveles permisibles en cuanto a la turbidez (1,705 UNT) y al pH (6) (Organización Mundial de la Salud, 2005).

6. Conclusiones

Las muestras de agua recolectadas en el Estero Medina de la parroquia Bellamaría en el cantón Santa Rosa de la provincia de El Oro, presentan un valor de turbidez superior al máximo permisible (5 UNT) establecido para este parámetro como criterio de calidad de fuentes de agua para consumo humano y doméstico, según el Acuerdo N° 028, por lo cual amerita un tratamiento a fin de que sea apta para el consumo humano.

El mucílago del biocoagulante *Opuntia ficus-indica* en forma fresca y desecada, constituye una alternativa a los métodos convencionales de tratamiento de aguas para consumo humano y doméstico, siendo más efectiva en forma fresca o cruda para clarificar el agua de la parroquia Bellamaría. El tratamiento con el biocoagulante fresco o desecado, permite cumplir con el máximo permisible (5 UNT) establecido por el Ministerio del Ambiente en su Acuerdo Ministerial N° 028. Las condiciones óptimas para su tratamiento son: método (mucílago fresco), pH (6), turbidez inicial (100 UNT) y dosis (200 mg/L), con las cuales se alcanza un valor promedio de turbidez correspondiente a 1,705 UNT.

Los parámetros fisicoquímicos evaluados en las aguas del Estero Medina tratadas con *Opuntia ficus-indica*, cumplen con lo estipulado en el Acuerdo Ministerial N° 028, ya que los valores promedio de turbidez se ubican en un rango inferior a 5 UNT (1,98-4,46 UNT) para las dosis estudiadas de este coagulante (50-200 mg/L), tanto en forma fresca como desecada; además, el pH presenta un intervalo (6,45-7,09 unidades) que en general cumple con la normativa vigente (6,5-8,5 unidades) para las dosis estudiadas y en sus diferentes métodos de preparación.

Se demostró la alta eficiencia del mucílago de *Opuntia ficus indica* en la remoción de turbidez, tanto en su forma fresca como desecada, al alcanzar porcentajes de remoción superiores al 97 %, que permiten clasificarlo como un coagulante primario, ya que supera el 70 % de la remoción de turbidez.

7. Recomendaciones

Considerar el uso doméstico del agua del Estero Medina de la parroquia Bellamaría en el cantón Santa Rosa de la provincia de El Oro, previo tratamiento con el biocoagulante del presente estudio, pero se sugiere desarrollar otro estudio sobre la efectividad de *O. ficus indica* en el control de parámetros microbiológicos.

Con el fin de aprovechar los beneficios que ofrece esta especie vegetal para el tratamiento de las aguas en la parroquia Bellamaría y debido a la fragilidad de los ecosistemas de plantas xerófilas, se recomienda promover el cultivo de la misma, a fin de no ejercer un impacto negativo en el ambiente que pudiera acarrear su desaparición.

Se sugiere en próximos estudios evaluar el comportamiento del coagulante con respecto a los parámetros color, alcalinidad y dureza entre otros. Asimismo, evaluarlo en aguas residuales domésticas.

Se recomienda la evaluación del potencial coagulante con otras especies de cactáceas que se encuentren en zonas con problemas de potabilidad del agua, de manera que, se pueda contribuir a solventar esta situación en pequeñas comunidades, pero de una manera amigable con el ambiente.

8. Bibliografía

- Aguirre, Z. (2012). Especies forestales de los bosques secos del Ecuador. Guía dendrológica para su identificación y caracterización. Proyecto Manejo Forestal Sostenible ante el cambio climático. Quito: Ministerio del Ambiente Ecuador. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Bosques-Secos4.pdf>
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua. coagulación y floculación. Lima: SEDAPAL. Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/andia.pdf>
- Angulo, G., Ricardo, J. y Coaquira, M. (2020). Uso de la Opuntia ficus-indica como agente natural para el tratamiento de aguas, a nivel de laboratorio, UMA. ÑAUPARISUN. Revista de Investigación Científica., 2(4), p.p. 57-64. Obtenido de <http://unaj.edu.pe/revista/index.php/vpin/article/view/110/77>
- APHA-AWWA-WEF. (2017). Standard Methods for the examination of water and wastewater. Obtenido de https://www.academia.edu/38769108/Standard_Methods_For_the_Examination_of_Water_and_Wastewater_23nd_edition
- Arancibia, M. (2011). Aplicación de quitosano como material bioabsorbente en el proceso de coagulación-floculación durante el tratamiento de agua para consumo humano. [Tesis de Maestría]. Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Obtenido de <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/1782/1/MSc.16.pdf>
- Arboleda, G. (2000). Teoría y práctica de la purificación del agua. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.

ASTM International Standards Worldwide. (2019). Normadoc. Obtenido de Standard Practice for Coagulation Flocculation Jar Test of Water: <https://www.normadoc.com/spanish/astm-d2035-19.html>

Atupaña, F. y Guacho, J. (2019). Determinación de la eficiencia del *Opuntia ficus-indica* como biocoagulante para el tratamiento de aguas superficiales del río Bulubulu.[Universidad de Guayaquil], Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/39847/1/401-1349%20-%20Determinac%20eficiencia%20opuntia%20ficus-indica%20como%20biocoagulante.pdf>

Barazarte, H., Terán, Y., D'Aubeterre, R., Pérez, L., Garmendia, C., Moreno, I., . . . Sánchez-Urdaneta, A. (2017). Características físicas y químicas de cladodios de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ), 34, p.p. 175-186. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Adriana_Sanchez12/publication/315746700_Caracteristicas_fisicas_y_quimicas_de_cladodios_de_Opuntia_ficus-indica_L_Mill/links/58e19b52aca272059ab07d40/Caracteristicas-fisicas-y-quimicas-de-cladodios-de-Opuntia-ficus-ind.

Barrenechea, A. (2004). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. En L. d. Vargas, Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría Tomo I (págs. 1-56). Lima, Perú: CEPIS/OPS. Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/read/13667949/tratamiento-de-agua-para-consumo-humano-plantas-de-filtracion->

Bouaouine, O., Bourven, I., Khalil, F. y Baudu, M. (2018). Identification of functional groups of *Opuntia ficus-indica* involved in coagulation process

after its active part extraction. Environmental Science and Pollution Research, 25, p.p. 11111-11119. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-018-1394-7>

Briceño, R., Fuentes, L., Mendoza, I., Bolaños, J. y Caldera, Y. (2014). Efectividad de una suspensión gelatinosa de huesos bovinos en la clarificación de aguas de alta turbidez. REDIELUZ, 4(2), p.p. 46-53. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Lorena_Fuentes4/publication/341056960_EFECTIVIDAD_DE_UNA_SUSPENSION_GELATINOSA_DE_HUESO_S_BOVINOS_EN_LA_CLARIFICACION_DE_AGUAS_CON_ALTA_TURBIDEZ/links/5eab512ea6fdcc70509de32f/EFECTIVIDAD-DE-UNA-SUSPENSION-GELATINOSA-DE

Camacho-Oviedo, H., Campos-Núñez, D., Mercado-Martínez, I., Cubillán-Acosta, N. y Castellar-Ortega, G. (2020). Uso de las cáscaras de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la clarificación del agua de la Ciénaga de Malambo. Investigación e Innovación en Ingenierías, 8(1), p.p. 100-111. doi:<https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3572>

Cárdenas, J. y Díaz, J. (2018). Opuntia ficus-indica como coagulante natural alternativo para la clarificación del agua cruda. Artículo de discusión, Universidad de Nariño-SIRED, Pasto. Obtenido de <http://sired.udenar.edu.co/5473/1/PDF%20Opuntia%20ficus%20indica%20como%20coagulante%20natural%20alternativo%20para%20la%20clarificacion%20de%20agua%20cruda.pdf>

Choque-Quispe, D., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A. y Ramos-Pacheco, B. (2018). Capacidad floculante de coagulantes naturales en el

tratamiento de agua. Tecnología Química, 38(2), p.p. 1-12. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000200008

Cogollo, J. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. DYNA, 78(165), p.p. 18-27. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49622372002>

Contreras, K., Mendoza, Y., Salcedo, G., Olivero, R. y Mendoza, G. (2015). El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación del agua. Producción + Limpia, 10(1), p.p. 40-50. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v10n1/v10n1a04.pdf>

Cuacés, M. (2013). Máquina desespinaadora de tunas para la variedad amarilla o de castilla (*Opuntia ficus-indica*). [Tesis de Pregrado] Universidad Técnica del Norte, Ibarra. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/3507/1/04%20MEC%20027%20TESIS.pdf>

Dasso, C., Piovano, E., Pasquini, A., Córdoba, F., Lecomte, K., Guerra, L. y Campodónico, V. (2014). Recursos hídricos superficiales. (págs. 1209-1231). Córdoba: Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Karina_Lecomte/publication/264935177_Recursos_Hidricos_Superficiales/links/549499100cf29b9448210025/Recursos-Hidricos-Superficiales.pdf

Díaz, J. (2019). Aplicación de la enzima papaína obtenida a partir de las semillas Carica papaya como coagulante natural para la remoción de turbidez en la PTAR-V.E.S. Villa El Salvador. [Tesis de Pregrado] Universidad Nacional

Tecnológica de Lima Sur, Lima. Obtenido de
repositorio.untels.edu.pe/handle/UNTELS/411

Exley, C. (2017). El aluminio debería considerarse ahora un factor etiológico primario en la enfermedad de Alzheimer. *Journal of Alzheimer's Disease Reports*(1), p.p. 23-25. Obtenido de
<https://content.iospress.com/download/journal-of-alzheimers-disease-reports/adr170010?id=journal-of-alzheimers-disease-reports%2Fadr170010>

Felkai-Haddache, L. R., Mamou-Belhabib, K., Picton, L., Madani, K. y Rihouey, C. (2016). Conventional and Microwave-Assisted Extraction of Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes: Physico-Chemical and Rheological Properties. *Food Bioprocess Technol*, 9, p.p. 481-492.
 doi:<https://doi.org/10.1007/s11947-015-1640-7>

Fernández, A. (2018). El agua en Latinoamérica. Programa Futuros: Escuela de Posgrado: Agua + Humedales. (Serie Futuros) y Fundación Innovación Tecnológica (FUNINTEC) [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de San Martín, Buenos Aires. Obtenido de
<http://ri.unsam.edu.ar/bitstream/handle/123456789/907/PFAH%202018%20CFCA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Fuentes, L., Mendoza, I., Chávez, A., Cedeño, N. y Ortiz, Y. (2017). Evaluación de la quitina como coagulante para la potabilización de aguas con alta turbidez. *Impacto científico*, 12(1), p.p. 89-106. Obtenido de
<https://biblat.unam.mx/hevila/Impactocientifico/2017/vol12/no1/6.pdf>

Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Bellamaría Cantón Santa Rosa. (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquial Bellamaría. Obtenido de

http://www.bellamariasantarosa.gob.ec/images/PDOT_BELLAMARIA_2015.pdf

González, Y., Fuentes, L., Mendoza, I. y Caldera, Y. (2015). Opuntia ficus-indica y Opuntia wentiana: estudio comparativo sobre su efectividad como coagulantes en la clarificación del agua. Revista Tecnocientífica URU (9), p.p. 81-89.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (25 de noviembre de 2020). Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>

Kiesling, R. (1998). Origen, Domesticación y Distribución de Opuntia ficus-indica. Journal of the Professional Association for Cactus Development, 3, 1-9. Obtenido de <http://www.jpacd.org/jpacd/article/view/159/134>

López, M. (2018). Evaluación del uso de la cactácea Opuntia ficus-indica como coagulante natural para el tratamiento de aguas. [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. Obtenido de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3541/lopez-perez-malena.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Lozano, L. (2018). Efecto en la disminución de la turbidez en el agua por floculantes de Opuntia ficus-indica (Tuna) con diferentes procesos de extracción en el río Chonta de Cajamarca, 2018. [Tesis de Pregrado]. Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo, Cajamarca. Obtenido de <http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/721/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Mariscal-Santi, W., García-Larreta, F., Mariscal-García, R., Cornejo_ortega, A., Ortega-Ramírez, P., Montiel-Rivera, T., . . . De La Torre-Quinonez, E. (2018). Polo del Conocimiento, 3(4), p.p. 133-149. doi:10.23857/pc.v3i4.471
- Martínez, C. (2019). Potabilización del agua. Madrid-España: Elearning, S. L. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=XfIDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Potabilizaci%C3%B3n+del+agua&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwi1hvqeiqPtAhURSTABHaaHCCAQ6AEwAHoECAEQAg#v=onepage&q=Potabilizaci%C3%B3n%20del%20agua&f=false>
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M. y Sillanpää, M. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. Advances in Colloid and Interface Science, 159(2), p.p. 189-197. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.007>
- Meza-Leones, M., Riaños-Donado, K., Mercado-Martínez, I., Olivero-Verbel, R. y Jurado-Eraso, M. (2018). Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleifera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo, Atlántico. Revista UIS Ingenierías, 17(2), p.p. 95-104. doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018009>
- Michelon, W., Reis, P., Knoblauch, P., Da Rosa, G., Mass, A., Verona, L., . . . Viancelli, A. (2020). Cladodes applied as decentralized ecotechnology to improve water quality and health in remote communities that lack sanitation. SN Applied Sciences, 2(149), p.p. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1919-9>
- Miller, S., Fugate, E., Oyanedel, V., Smith, J. y Zimmerman, J. (2008). Toward Understanding the Efficacy and Mechanism of Opuntia spp. as a Natural

- Coagulant for Potential Application in Water Treatment. Environ. Sci. Technol., 42(12), p.p. 4274-4279. doi:<https://doi.org/10.1021/es7025054>
- Miñano, B., Pacora, L., Velásquez, M., Guarniz, M., Enríquez, A. y Vásquez, P. (2012). Efecto del uso de floculante natural de *Opuntia ficus-indica* M. “tuna” en la disminución de la carga bacteriana de las aguas superficiales del distrito de Santa Rosa, Pallasca, Ancash. Conocimiento para el desarrollo, 3(2), p.p. 1-7. Obtenido de <http://repebis.upch.edu.pe/articulos/conocim.desarro/v3n2/a1.pdf>
- Molina-Vera, A., Pozo, M. y Serrano, J. (2018). Agua, saneamiento e higiene. Quito: INEC-UNICEF. Obtenido de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/AGUA,_SANEAMIENTO_e_HIGIENE.pdf
- Monttilla, A., Tovar, I. y Pacheco, H. (2020). Cuantificación de pectinas en la pulpa del fruto de tres especies de tuna (*Opuntioideae*, *Cactaceae*). La Técnica. Revista de las Agrociencias.(23), p.p. 25-32. Obtenido de <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/latecnica/article/view/1875/2691>
- Morejón, B. (2017). Utilización del mucílago de tuna (*Opuntia ficus-indica*) en el mejoramiento de la calidad del agua de consumo humano, en la comunidad de Pusir Grande, provincia del Carchi. [Tesis de Pregrado]. Universidad Técnica del Norte, Ibarra. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/6621/1/PG%20496%20TESIS.pdf>
- Oliveira, N., Pinheiro, K., De Oliveira, B., Cordeiro, F. y Neves, A. (2018). Tratamento de água com *Moringa oleifera* como coagulante/floculante

natural. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente., 9(1), 373-382. doi:<http://dx.doi.org/10.31072/rcf.v9i1.539>

Olivero, R., Aguas, Y., Mercado, I., Casas, D. y Montes, L. (2014). Utilización de Tuna Opuntia ficus indica como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. AVANCES Investigación en Ingeniería, 11(1), p.p. 70-75. Obtenido de <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/302/238>

Olivero, R., Mercado, I. y Montes, L. (2013). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal Opuntia ficus-indica. Producción + Limpia, 8(1), p.p. 19-27. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552013000100003&script=sci_abstract&tlng=es

Oña, M. y Venegas, D. (2020). Evaluación de la capacidad del quitosano extraído de la cáscara de cangrejo como coagulante para potabilización. [Tesis de Pregrado]. Escuela Politécnica Nacional, Quito. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/21072/1/CD%2010589.pdf>

Organización Mundial de la Salud. (2005). Guías para la calidad del agua potable. Organización Mundial de la Salud. Recuperado el 27 de noviembre de 2020, de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2017). Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene. Suiza: Organización Mundial de la Salud y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). Obtenido de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/260291/9789243512891->

spa.pdf;jsessionid=1AA060F29B95CAAFDE938B13B90265BE?sequence=1

- Pascoe-Ortiz, S., Rodríguez-Macías, R., Robledo-Ortiz, J., Salcedo-Pérez, E., Zamora-Natera, J., Rabelero-Velasco, M. y Vargas-Radillo, J. (2019). Identificación de propiedades presentes en jugo de *Opuntia megacantha* Salm-Dyck importantes para la producción de biopolímeros. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 22, p.p. 1-10. doi:10.22201/fesz.23958723e.2019.0.197
- Pérez, W. y López-Gonzales, J. (2017). Aplicación de un diseño factorial 24 en la remoción de turbiedad del Río Rímecc mediante la coagulación y floculación usando goma de tara. *Revista de Investigación, Ciencia, Tecnología y Desarrollo.*, 3(1), p.p. 18-28. doi:http://dx.doi.org/10.17162/rictd.v1i1.895
- Porras-Flórez, D., Albesiano, S. y Arrieta-Violet, L. (2017). El género *Opuntia* (Opuntioideae-Cactaceae) en el departamento de Santander Colombia. *Biota Colombiana*, 18(2), p.p. 111-131. doi:10.21068/c2017.v18n02a07
- Ramírez, H. y Jaramillo, J. (2015). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 136-153. doi:http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.1303
- Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador. (2008). Constitución de la República del Ecuador. Obtenido de <https://www.fiscalia.gob.ec/images/Transparencia/2017/Junio/a2/constitucion-de-la-republica-del-ecuador.pdf>
- Registro Oficial Órgano del Gobierno del Ecuador. (13 de Febrero de 2015). Acuerdo ministerial N° 028. Obtenido de www.registroficial.gob.ec.

Registro Oficial. Edición Especial N° 387. (4 de noviembre de 2015). Acuerdo Ministerial N° 097-A. Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua. Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes. Normativas. Quito, Ecuador.

Rodiño-Arguello, J., Fera-Díaz, J., Paternina-Urbe, R. y Marrugo-Negrete, J. (2015). Sinú River raw water treatment by natural coagulants. *Revista Facultad de Ingeniería* (76), p.p. 90-96. doi:10.17533/udea.redin.n76a11

Rodríguez-Villacis, J., Hernández-Gavilánez, L., Silva-Huilecapi, C., Alvarado_Alvarado, H., Mariscal-García, R. y García-Larreta, F. y.-S. (2017). Evaluación de la contaminación físico-química y microbiológica de aguas del estero salado. *Dom. Cien.*, 3(4), p.p. 672-691. Obtenido de <http://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/index>

Romero, J. (2005). *Calidad del agua*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rosero, M., Latorre, J., Torres, W. y Delgado, L. (2004). Presencia de materia orgánica y subproductos de la desinfección con cloro. Caso sistema de tratamiento de agua para consumo humano, Puerto Mallarino, Cali-Colombia. Seminario Internacional: Visión integral en el mejoramiento de la calidad del agua (pág. 10). Cali: Universidad del Valle. Instituto Cinara. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Milton_Rosero_Moreano/publication/260182296_Presencia_de_Materia_Organica_y_Subproductos_de_la_Desinfeccion_con_Cloro_Caso_Sistema_de_Tratamiento_de_Agua_para_Consumo_Humano_Puerto_Mallarino_Cali-Colombia/links/02e7e52

- Samame, Y. (2019). Dosis óptima del mucílago de *Opuntia ficus-indica* para mejorar la calidad del agua del río la Leche, Lambayeque. Trabajo de Titulación, Universidad César Vallejo, Chiclayo-Perú. Obtenido de http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/35380/Samame_TYY.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Schweich, D. (27 de noviembre de 2020). [wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1904653). Obtenido de <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1904653>
- Sierra-Julio, A., Navarro-Silva, A., Mercado-Martínez, I., Flórez-Vergara, A. y Jurado-Eraso, M. (2019). Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando médula de banano como coagulante. *Revista UIS Ingenierías*, 18(4), p.p. 131-138. doi:10.18273/revuin.v18n4-2019012
- Tarrillo, H. y Tenorio, M. (2019). Eficiencia del coagulante-floculante tuna (*Opuntia ficus*) para la clarificación de las aguas de la acequia El Pueblo de Ferreñafe-2019. Trabajo de Titulación, Universidad de Lambayeque, Chiclayo-Perú. Obtenido de <https://repositorio.udl.edu.pe/bitstream/UDL/331/1/Tesis%20Tarrillo%20y%20Tenorio.pdf>
- Trujillo, D., Duque, L., Arcila, J., Rincón, A., Pacheco, S. y Herrera, O. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Rev. Ion.*, 27(1), p.p. 17-34.
- Villabona, A., Paz, I. y Martínez, J. (2013). Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. *Rev. Colomb. Biotecnol.*, XV(1), p.p. 137-144. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v15n1/v15n1a14.pdf>

Villanueva, J. (2019). Efecto de tres concentraciones de mucílago de tuna (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) y de San Pedro (*Echinopsis pachanoi* (Britton & Rose) Fiedrich & G.D. Rowley) en la clarificación del agua. Cajamarca-Perú.

9. Anexos



Figura 18. Cladodios, flores y frutos de *Opuntia ficus-indica*
Fuente: Schweich, 2020



Figura 19. Especímenes de *Opuntia ficus-indica* localizados en el Estero Medina,
parroquia Bellamaría, cantón Santa Rosa
Fuente: Ruiz, 2020.

9.1 Mapa de localización del área de investigación

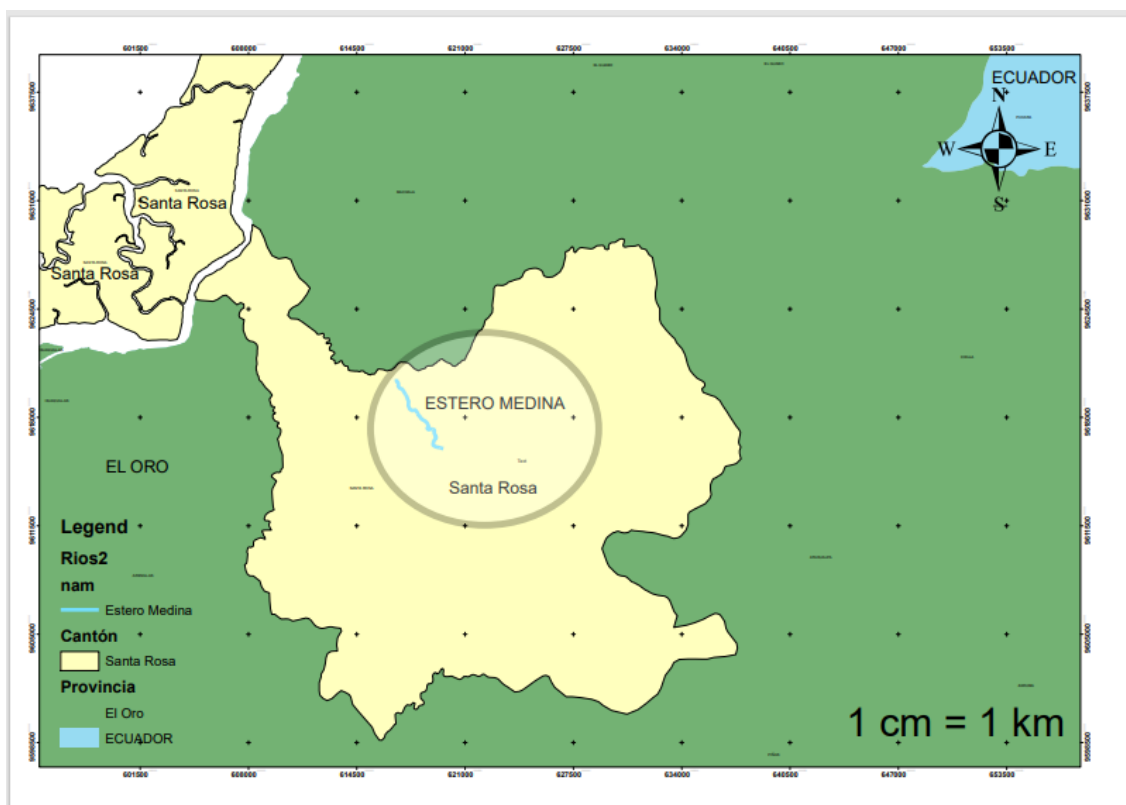


Figura 20. Representación del área de muestreo mediante ArcMap.
Fuente: Ruiz, 2021



Figura 21. Lugar de muestreo Sitio Estero Medina.
Fuente: Ruiz, 2021

9.2 Resultados

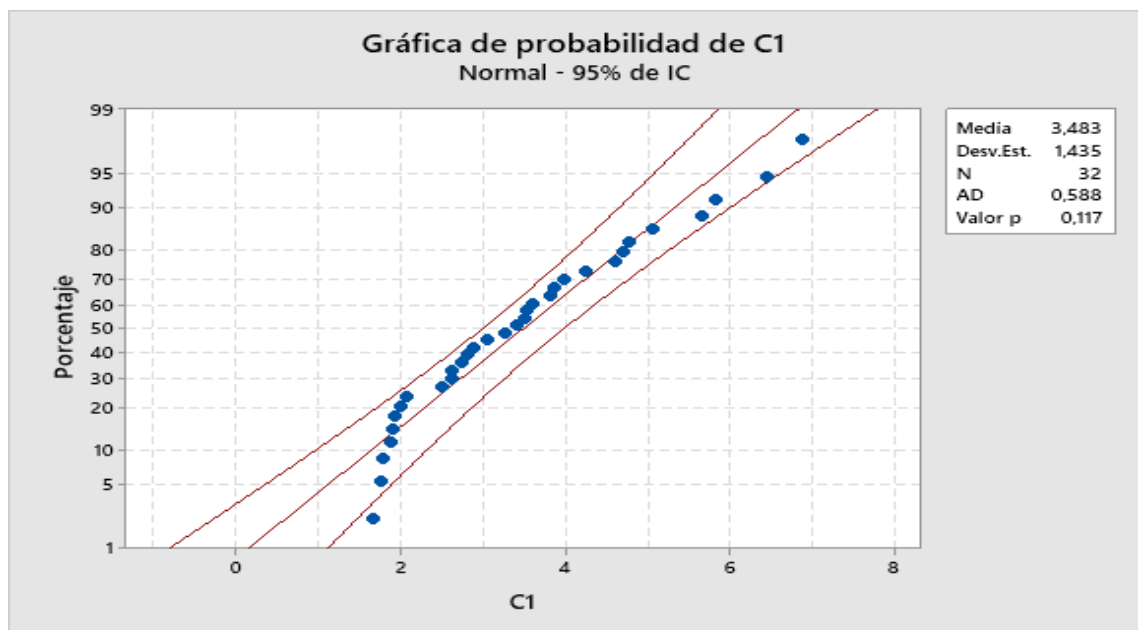


Figura 22. Supuesto de normalidad mediante grafica de Minitab.
Fuente. Minitab

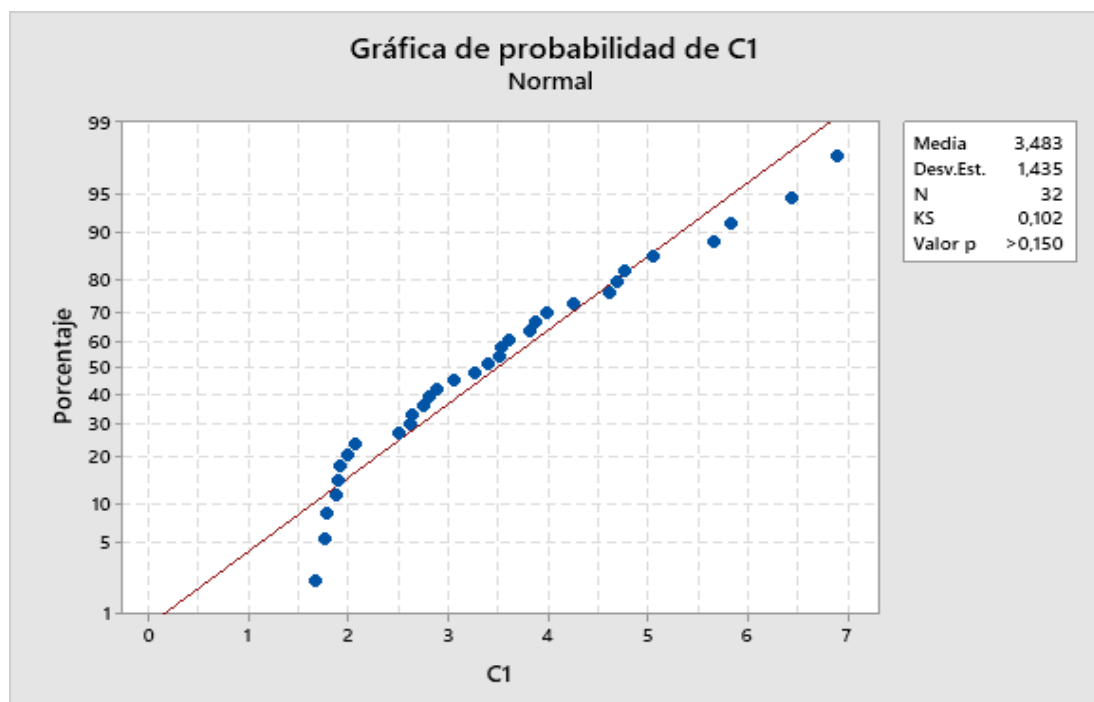


Figura 23. Prueba de Normalidad de Kolmogorov-Smirnov con Minitab.
Fuente. Minitab.

Tabla 10. Supuesto de homogeneidad.

Hipótesis nula	Todas las varianzas son iguales
Hipótesis alterna	Por lo menos una varianza es diferente
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

		Dosis de Opuntia					
Método	pH	Turbidez inicial	ficus indica	N	Desv.Est.	IC	
a	6	100	50	2	0,395980	(0,125198; 202,205)	
a	6	100	200	2	0,063640	(0,020121; 32,497)	
a	6	400	50	2	0,120208	(0,038007; 61,384)	
a	6	400	200	2	0,077782	(0,024593; 39,719)	
a	8	100	50	2	0,325269	(0,102842; 166,097)	
a	8	100	200	2	0,098995	(0,031300; 50,551)	
a	8	400	50	2	0,063640	(0,020121; 32,497)	
a	8	400	200	2	0,056569	(0,017885; 28,886)	
b	6	100	50	2	0,869741	(0,274989; 444,130)	
b	6	100	200	2	0,056569	(0,017885; 28,886)	
b	6	400	50	2	0,318198	(0,100606; 162,486)	
b	6	400	200	2	0,084853	(0,026828; 43,330)	
b	8	100	50	2	0,275772	(0,087192; 140,822)	
b	8	100	200	2	0,021213	(0,006707; 10,832)	
b	8	400	50	2	0,572756	(0,181091; 292,476)	
b	8	400	200	2	0,332340	(0,105077; 169,708)	

Nivel de confianza individual = 99,6875%

Figura 24. Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar.

Fuente. Minitab

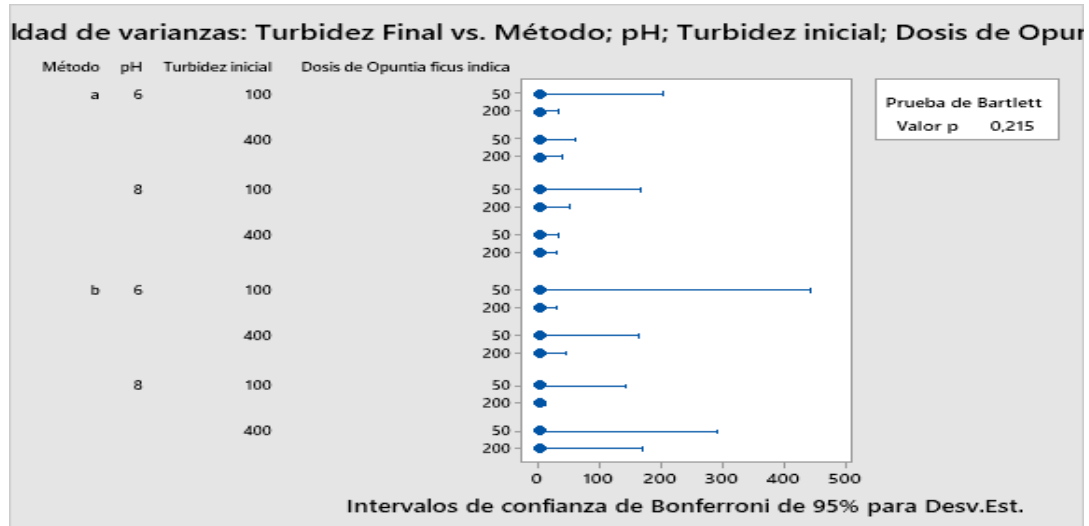


Figura 25. Turbidez Final y Dosis Oportuna.

Fuente: Minitab

ANÁLISIS FACTORIAL

Término	Efecto	EE del			Valor T
		Coef	coef.	coef.	
Constante		3,4825	0,0574		60,66
Método	0,4150	0,2075	0,0574		3,61
pH	-0,3138	-0,1569	0,0574		-2,73
Turbidez inicial	1,4050	0,7025	0,0574		12,24
Dosis de Opuntia ficus indica	-2,1625	-1,0813	0,0574		-18,83
Método*pH	-0,0813	-0,0406	0,0574		-0,71
Método*Turbidez inicial	0,0425	0,0212	0,0574		0,37
Método*Dosis de Opuntia ficus indica	-0,0975	-0,0488	0,0574		-0,85
pH*Turbidez inicial	-0,1588	-0,0794	0,0574		-1,38
pH*Dosis de Opuntia ficus indica	0,6213	0,3106	0,0574		5,41
Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	-0,3375	-0,1687	0,0574		-2,94
Método*pH*Turbidez inicial	0,0162	0,0081	0,0574		0,14
Método*pH*Dosis de Opuntia ficus indica	0,1738	0,0869	0,0574		1,51
Método*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	0,0950	0,0475	0,0574		0,83
pH*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	0,4662	0,2331	0,0574		4,06
Método*pH*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	0,2212	0,1106	0,0574		1,93
Término	Valor p	FIV			
Constante	0,000				
Método	0,002	1,00			
pH	0,015	1,00			
Turbidez inicial	0,000	1,00			
Dosis de Opuntia ficus indica	0,000	1,00			
Método*pH	0,489	1,00			
Método*Turbidez inicial	0,716	1,00			
Método*Dosis de Opuntia ficus indica	0,408	1,00			
pH*Turbidez inicial	0,186	1,00			
pH*Dosis de Opuntia ficus indica	0,000	1,00			
Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	0,010	1,00			
Método*pH*Turbidez inicial	0,889	1,00			
Método*pH*Dosis de Opuntia ficus indica	0,150	1,00			
Método*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	0,420	1,00			
pH*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	0,001	1,00			
Método*pH*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	0,072	1,00			

Figura 26. Coeficientes Codificados.

Fuente: Minitab

		R-cuad.	R-cuad.
	S	R-cuad. (ajustado)	(pred)
	0,324740	97,36%	94,88%
			89,43%

Figura 27. Resumen del modelo.

Fuente: Minitab

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.
Modelo	15	62,1591	4,1439
Lineal	4	55,3688	13,8422
Método	1	1,3778	1,3778
pH	1	0,7875	0,7875
Turbidez inicial	1	15,7922	15,7922
Dosis de Opuntia ficus indica	1	37,4113	37,4113
Interacciones de 2 términos	6	4,3438	0,7240
Método*pH	1	0,0528	0,0528
Método*Turbidez inicial	1	0,0144	0,0144
Método*Dosis de Opuntia ficus indica	1	0,0760	0,0760
pH*Turbidez inicial	1	0,2016	0,2016
pH*Dosis de Opuntia ficus indica	1	3,0876	3,0876
Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	1	0,9112	0,9112
Interacciones de 3 términos	4	2,0549	0,5137
Método*pH*Turbidez inicial	1	0,0021	0,0021
Método*pH*Dosis de Opuntia ficus indica	1	0,2415	0,2415
Método*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	1	0,0722	0,0722
pH*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	1	1,7391	1,7391
Interacciones de 4 términos	1	0,3916	0,3916
Método*pH*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	1	0,3916	0,3916
Error	16	1,6873	0,1055
Total	31	63,8464	
Fuente	Valor F	Valor p	
Modelo	39,30	0,000	
Lineal	131,26	0,000	
Método	13,07	0,002	
pH	7,47	0,015	
Turbidez inicial	149,75	0,000	
Dosis de Opuntia ficus indica	354,76	0,000	
Interacciones de 2 términos	6,87	0,001	
Método*pH	0,50	0,489	
Método*Turbidez inicial	0,14	0,716	
Método*Dosis de Opuntia ficus indica	0,72	0,408	
pH*Turbidez inicial	1,91	0,186	
pH*Dosis de Opuntia ficus indica	29,28	0,000	
Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	8,64	0,010	
Interacciones de 3 términos	4,87	0,009	
Método*pH*Turbidez inicial	0,02	0,889	
Método*pH*Dosis de Opuntia ficus indica	2,29	0,150	
Método*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	0,68	0,420	
pH*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	16,49	0,001	
Interacciones de 4 términos	3,71	0,072	
Método*pH*Turbidez inicial*Dosis de Opuntia ficus indica	3,71	0,072	
Error			
Total			

Figura 28. Análisis de Varianza.

Fuente: Minitab

$$\begin{aligned}
 \text{Turbidez Final} = & 2,91 - 0,37 \text{ Método} + 0,105 \text{ pH} + 0,02839 \text{ Turbidez inicial} \\
 & - 0,0034 \text{ Dosis de Opuntia ficus indica} + 0,108 \text{ Método} * \text{pH} \\
 & + 0,00784 \text{ Método} * \text{Turbidez inicial} \\
 & + 0,0074 \text{ Método} * \text{Dosis de Opuntia ficus indica} - 0,003119 \text{ pH} * \text{Turbidez inicial} \\
 & - 0,00104 \text{ pH} * \text{Dosis de Opuntia ficus indica} \\
 & - 0,000160 \text{ Turbidez inicial} * \text{Dosis de Opuntia ficus indica} \\
 & - 0,001175 \text{ Método} * \text{pH} * \text{Turbidez inicial} \\
 & - 0,00130 \text{ Método} * \text{pH} * \text{Dosis de Opuntia ficus indica} \\
 & - 0,000065 \text{ Método} * \text{Turbidez inicial} * \text{Dosis de Opuntia ficus indica} \\
 & + 0,000021 \text{ pH} * \text{Turbidez inicial} * \text{Dosis de Opuntia ficus indica} \\
 & + 0,000010 \text{ Método} * \text{pH} * \text{Turbidez inicial} * \text{Dosis de Opuntia ficus indica}
 \end{aligned}$$

Figura 29. Ecuación de regresión en unidades no codificadas.

Fuente: Minitab

Turbidez		Resid		
Obs	Final Ajuste	Resid	est.	
4	4,770	4,155	0,615	2,68 R
17	3,540	4,155	-0,615	-2,68 R

Residuo grande R

Figura 30. Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes.

Fuente: Minitab

Estructura de alias

Factor	Nombre
A	Método
B	pH
C	Turbidez inicial
D	Dosis de Opuntia ficus indica
Alias	
I	
A	
B	
C	
D	
AB	
AC	
AD	
BC	
BD	
CD	
ABC	
ABD	
ACD	
BCD	
ABCD	

Figura 31. Estructura de alias

Fuente: Minitab

GRÁFICA NORMAL

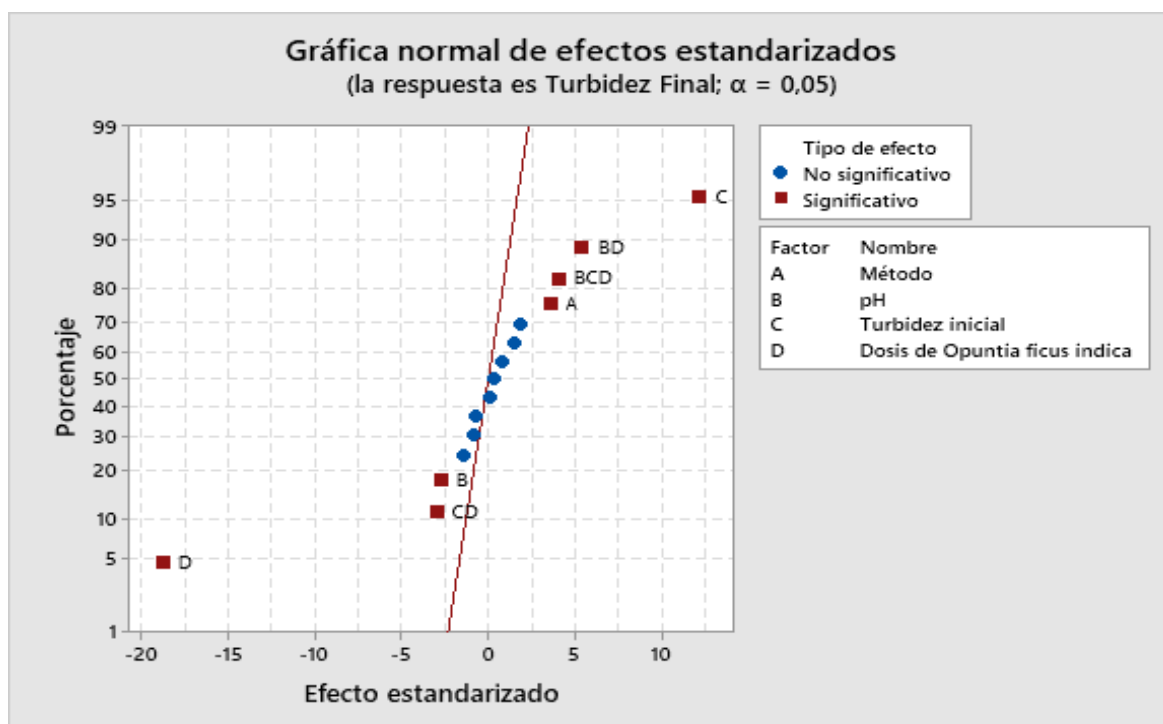


Figura 32. Grafica normal de efectos estandarizados.
Fuente: Minitab

DIAGRAMA DE PARETO

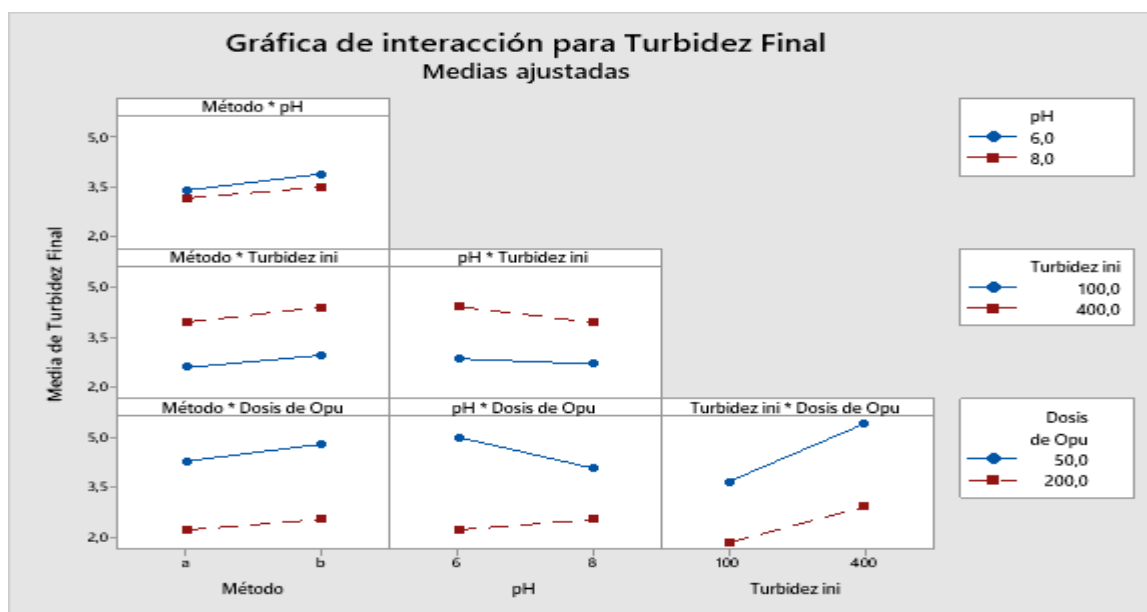


Figura 33. Gráfica de interacción para turbidez final.
Fuente: Minitab

GRÁFICOS DE INTERACCIONES

Gráfica de efectos principales

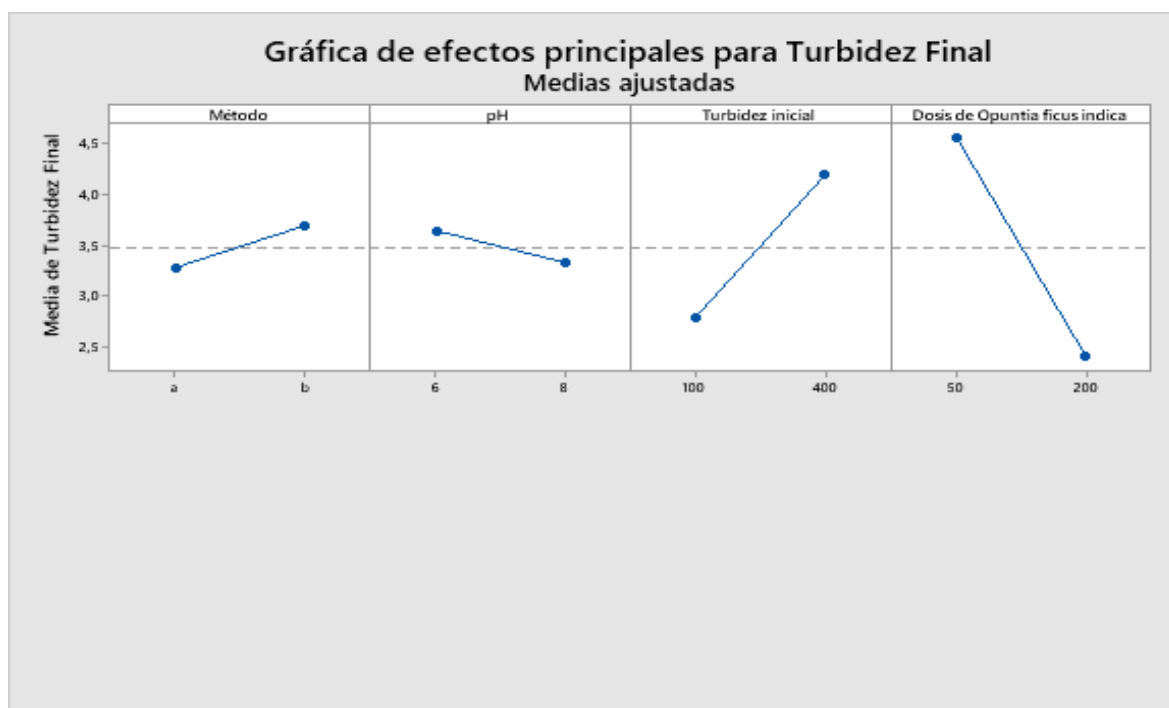


Figura 34. Gráfica de efectos principales para Turbidez Final.
Fuente: Minitab

Gráfica de interacción

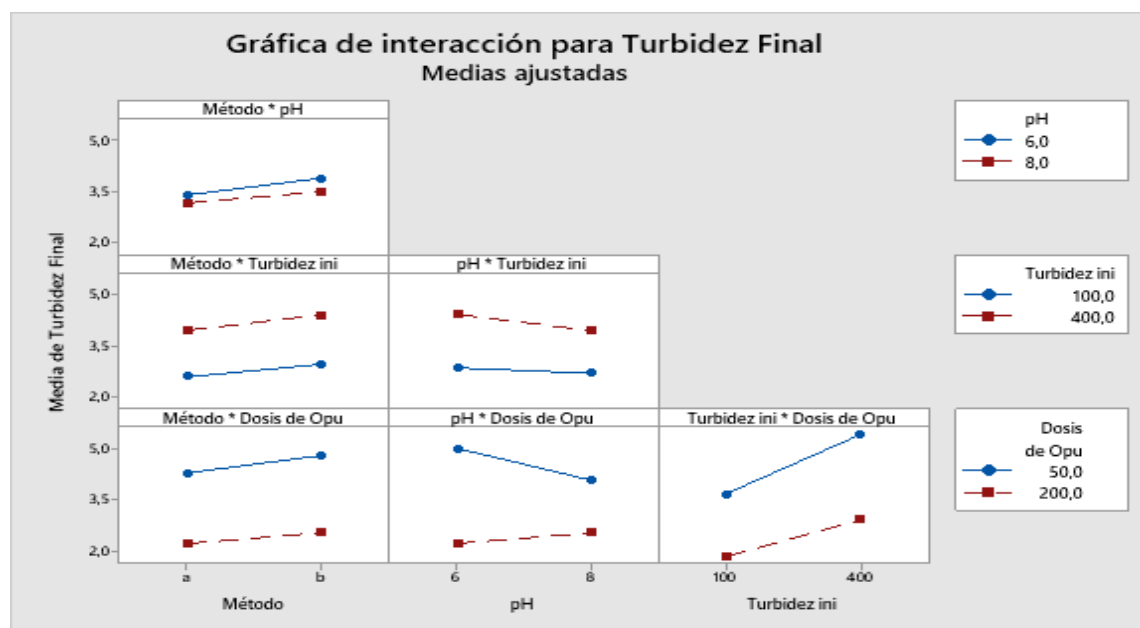


Figura 35. Gráfica de interacción para turbidez final.
Fuente: Minitab

Gráfica de cubos

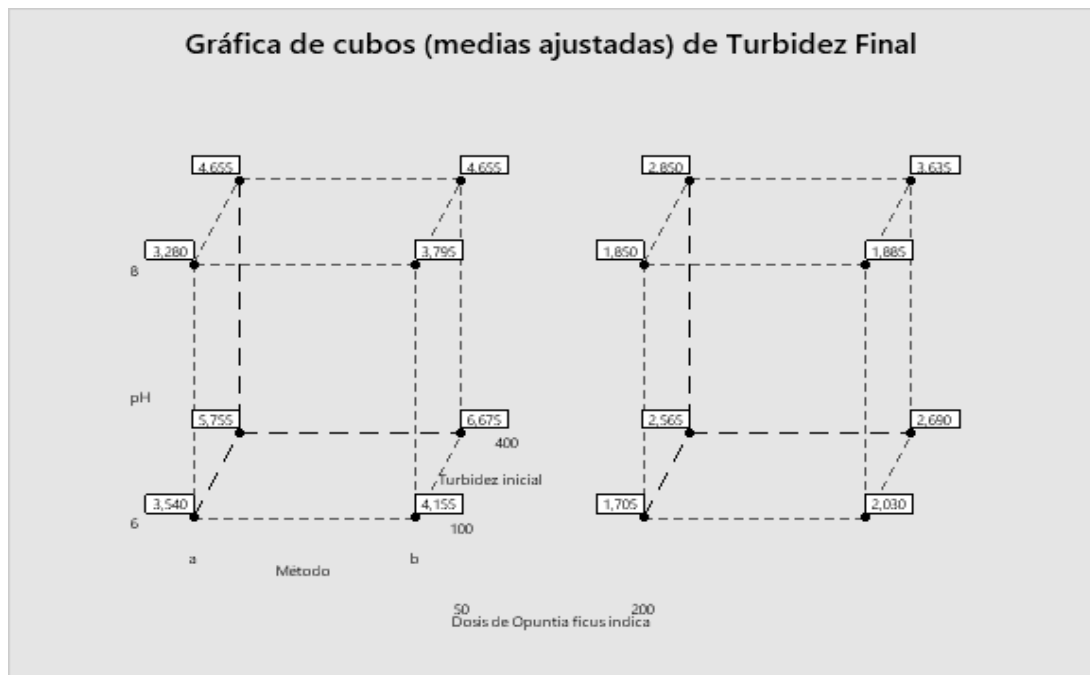


Figura 36. Gráfica de Cubos.

Fuente: Minitab

Los factores óptimos son para la menor turbidez alcanzada (1,705 UNT)

Tabla 11. Procedimiento realizado a cada una de las dosis con su orden respectivo.

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Método	pH	Turbidez inicial	Dosis de <i>Opuntia ficus indica</i>	Turbidez final
28	1	1	1	b	8	100	200	1,9
1	2	1	1	a	6	100	50	3,26
3	3	1	1	a	8	100	50	3,05
18	4	1	1	b	6	100	50	4,77
12	5	1	1	b	8	100	200	1,87
13	6	1	1	a	6	400	200	2,51
4	7	1	1	b	8	100	50	3,99
22	8	1	1	b	6	400	50	6,45
27	9	1	1	a	8	100	200	1,78
10	10	1	1	b	6	100	200	1,99
32	11	1	1	b	8	400	200	3,4
30	12	1	1	b	6	400	200	2,63
23	13	1	1	a	8	400	50	4,7
31	14	1	1	a	8	400	200	2,81
9	15	1	1	a	6	100	200	1,75
26	16	1	1	b	6	100	200	2,07
2	17	1	1	b	6	100	50	3,54
21	18	1	1	a	6	400	50	5,67
8	19	1	1	b	8	400	50	5,06
19	20	1	1	a	8	100	50	3,51
24	21	1	1	b	8	400	50	4,25
16	22	1	1	b	8	400	200	3,87
29	23	1	1	a	6	400	200	2,62
20	24	1	1	b	8	100	50	3,6
7	25	1	1	a	8	400	50	4,61
5	26	1	1	a	6	400	50	5,84

17	27	1	1	a	6	100	50	3,82
11	28	1	1	a	8	100	200	1,92
25	29	1	1	a	6	100	200	1,66
15	30	1	1	a	8	400	200	2,89
6	31	1	1	b	6	400	50	6,9
14	32	1	1	b	6	400	200	2,75

Fuente: Ruiz, 2021