

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“EVALUACIÓN DEL USO DE LA CACTÁCEA *Opuntia ficus-indica*
COMO COAGULANTE NATURAL PARA
EL TRATAMIENTO DE AGUAS”**

Presentada por:

MALENA LÓPEZ PÉREZ

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA AMBIENTAL**

Lima-Perú

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“EVALUACIÓN DEL USO DE LA CACTÁCEA *Opuntia ficus-indica*
COMO COAGULANTE NATURAL PARA
EL TRATAMIENTO DE AGUAS”**

Presentada por:

MALENA LÓPEZ PÉREZ

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Maest. Cs. Juan Torres Guevara
PRESIDENTE

Dra. Rosemary Vela Cardich
MIEMBRO

Mg. Sc. Wilfredo Baldeón Quispe
MIEMBRO

Ing. Lawrence Quipuzco Ushñahua
ASESOR

A mi papá Carlos López Rengifo

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque todo lo que pueda lograr es gracias a Él.

A mi papá, porque desde el principio hasta el final me apoyó durante el proceso de ejecución y presentación de este trabajo de investigación.

A mi hermano Carlo, familiares (Yanet, Gabriela, Gladys, Noemí) y amigas (Fiorella, Lesly y Mariela), por animarme constantemente para culminar esta investigación.

Al Ing. Lawrence Quipuzco por su asesoría, y a los miembros del jurado por sus recomendaciones, para el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Partículas coloidales	3
2.1.1 Propiedades de los coloides	5
2.1.2 Estabilidad de los coloides.....	6
2.2 Remoción de las partículas coloidales.....	8
2.2.1 Coagulación y floculación	9
2.2.2 Mecanismos de la coagulación	12
2.2.3 Etapas de la coagulación.....	12
2.2.4 Tipos de coagulación	13
2.2.5 Factores que influyen en la coagulación.....	15
2.3 Tipos de coagulantes	19
2.3.1 Coagulantes sintéticos	19
2.3.2 Coagulantes naturales	19
2.4 Ensayo de la prueba de jarras.....	22
2.5 Parámetros fisicoquímicos del agua	22
2.5.1 Turbiedad.....	23
2.5.2 Color	24
2.5.3 Conductividad.....	25
2.5.4 pH	25
2.6 Cactus <i>Opuntia ficus-indica</i>	26
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
3.1 Materiales.....	31
3.1.1 Materiales de laboratorio	31
3.1.2 Equipos	31
3.1.3 Insumos	32
3.2 Metodología experimental	32
3.2.1 Preparación de las muestras de agua sintética	32
3.2.2 Preparación del coagulante natural	33

3.2.3	Dosificación del coagulante natural.....	37
3.2.4	Programación y funcionamiento del equipo de la prueba de jarras.....	39
3.2.5	Determinación de los parámetros óptimos del coagulante natural	40
3.2.6	Evaluación de variación de parámetros fisicoquímicos.....	43
3.2.7	Análisis Estadístico.....	45
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
4.1	Determinación de los parámetros óptimos del coagulante natural	47
4.1.1	Resultados en muestras de 20 UNT.....	47
4.1.2	Resultados en muestras de 50 UNT.....	52
4.1.3	Resultados en muestras de 100 UNT.....	56
4.1.4	Resultados en muestras de 300 UNT.....	61
4.1.5	Resultados en muestras de 500 UNT.....	65
4.1.6	Determinación de la ecuación de regresión	69
4.2	Evaluación variación de parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua.	71
4.2.1	Turbiedad residual	72
4.2.2	pH residual.....	75
4.2.3	Conductividad residual	79
4.2.4	Color residual.....	81
V.	CONCLUSIONES.....	85
VI.	RECOMENDACIONES.....	87
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
VIII.	ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Efecto al disminuir el tamaño de las partículas	4
Tabla 2: Análisis fitoquímico del cactus <i>Opuntia-ficus indica</i>	29
Tabla 3: Propiedad del polvo de cactus <i>Opuntia ficus-indica</i>	29
Tabla 4: Dosis del coagulante natural aplicadas por nivel de turbidez	38
Tabla 5: Programación del equipo de jarras	39
Tabla 6: Dosis del coagulante químico aplicadas por cada nivel de turbidez	44
Tabla 7: Parámetros fisicoquímicos medidos.....	44
Tabla 8: Rango de precisión de los experimentos	45
Tabla 9: Dosis óptima en muestras de 20 UNT.....	47
Tabla 10: Concentración óptima en muestras de 20 UNT	48
Tabla 11: pH óptimo en muestras de 20 UNT	49
Tabla 12: Dosis óptima en muestras de 50 UNT.....	52
Tabla 13: Concentración óptima en muestras de 50 UNT	53
Tabla 14: pH óptimo en muestras de 50 UNT.....	54
Tabla 15: Dosis óptima en muestras de 100 UNT.....	57
Tabla 16: Concentración óptima en muestras de 100 UNT	58
Tabla 17: pH óptimo en muestras de 100 UNT	59
Tabla 18: Dosis óptima en muestras de 300 UNT.....	61
Tabla 19: Concentración óptima en muestras de 300 UNT	62
Tabla 20: pH óptimo en muestras de 300 UNT	63
Tabla 21: Dosis óptima en muestras de 500 UNT.....	65
Tabla 22: Concentración óptima en muestras de 500 UNT.....	66
Tabla 23: pH óptimo en muestras de 500 UNT	67
Tabla 24: Turbidez residual vs dosis óptima	70
Tabla 25: Turbidez residual del coagulante natural y químico.....	72
Tabla 26: Valores promedio de pH residual.....	75
Tabla 27: Valores promedio de la conductividad final.....	79
Tabla 28: Color residual al aplicar el coagulante natural y coagulante químico	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribución del tamaño de las partículas en el agua.....	3
Figura 2: Modelo de la doble capa difusa de Stern-Gouy.....	8
Figura 3: Desestabilización del coloide	9
Figura 4: Etapas de la coagulación.....	13
Figura 5: Coagulación de adsorción.....	14
Figura 6: Coagulación de barrido.....	15
Figura 7: Zonas de coagulación	17
Figura 8: Relación de la dosis del coagulante y la concentración coloidal.....	17
Figura 9: Imagen <i>Opuntia ficus-indica</i>	28
Figura 10: Preparación de las muestras de agua.....	33
Figura 11: Pencas de cactus <i>Opuntia ficus-indica</i> recolectadas.....	34
Figura 12: Reducción de la pulpa de cactus	34
Figura 13: Tiras de cactus antes del proceso de secado	35
Figura 14: Tiras de cactus deshidratado	35
Figura 15: Polvo de cactus <i>Opuntia ficus-indica</i> matizado	36
Figura 16: Extracción de los pigmentos del cactus	36
Figura 17: Coagulante en polvo obtenido del cactus <i>Opuntia ficus-indica</i>	37
Figura 18: Equipo de la prueba de jarras en funcionamiento	40
Figura 19: Jarras en reposo con tomadores de muestras	40
Figura 20: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 20 UNT	48
Figura 21: Concentración óptima del coagulante natural en muestras de 20 UNT.....	49
Figura 22: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 20 UNT	50
Figura 23: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 50 UNT	52
Figura 24: Concentración óptima del coagulante natural en muestras de 50 UNT.....	53
Figura 25: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 50 UNT	54
Figura 26: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 100 UNT	57
Figura 27: Concentración óptima en muestras de 100 UNT.....	58
Figura 28: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 100 UNT	59
Figura 29: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 300 UNT	61
Figura 30: Concentración óptima del coagulante natural en muestras de 300 UNT.....	62

Figura 31: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 300 UNT	63
Figura 32: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 500 UNT	66
Figura 33: Concentración óptima del coagulante natural en muestras de 500 UNT.....	67
Figura 34: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 500 UNT	68
Figura 35: Correlación turbidez inicial y dosis del coagulante natural.....	70
Figura 36: Remoción de turbiedad al aplicar el coagulante natural y químico.....	72
Figura 37: Variación del pH en muestras con pH natural	76
Figura 38: Variación del pH en muestras con pH 5	76
Figura 39: Variación del pH en muestras con pH 7	77
Figura 40: Variación del pH en muestras con pH 9	77
Figura 41: Variación de la conductividad al aplicar el coagulante natural y químico.....	80
Figura 42: Remoción de color al aplicar el coagulante natural y químico.....	82

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados dosis óptima del coagulante natural y químico	94
Anexo 1.1. Muestras de 500 UNT	94
Anexo 1.2. Muestras de 300 UNT	95
Anexo 1.3. Muestras de 100 UNT	96
Anexo 1.4. Muestras de 50 UNT	97
Anexo 1.5. Muestras de 20 UNT	98
Anexo 2. Resultados concentración óptima del coagulante natural y químico.....	99
Anexo 2.1. Muestras de 500 UNT	99
Anexo 2.2. Muestras de 300 UNT	100
Anexo 2.3. Muestras de 100 UNT	101
Anexo 2.4. Muestras de 50 UNT	102
Anexo 2.5. Muestras de 20 UNT	103
Anexo 3. Resultados pH óptimo del coagulante natural y químico	104
Anexo 3.1. Muestras de 500 UNT	104
Anexo 3.2. Muestras de 300 UNT	107
Anexo 3.3. Muestras de 100 UNT	110
Anexo 3.4. Muestras de 50 UNT	113
Anexo 3.5. Muestras de 20 UNT	116
Anexo 4. Resultados de Análisis Estadístico	119
Anexo 4.1. Dosis óptima del coagulante natural	119
Anexo 4.2. Concentración óptima del coagulante natural y químico.....	121
Anexo 4.3. pH óptimo del coagulante natural y químico	123
Anexo 4.4. Relación Turbiedad inicial vs Dosis del coagulante	124
Anexo 5. Resultados parámetros óptimos coagulante químico	125
Anexo 5.1 Muestras de 20 UNT	125
Anexo 5.2 Muestras de 50 UNT	126
Anexo 5.3 Muestras de 100 UNT	127
Anexo 5.4 Muestras de 300 UNT	128
Anexo 5.5 Muestras de 500 UNT	129
Anexo 6. Fotografías del ensayo de la prueba de jarras.....	130

RESUMEN

En el presente estudio se 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, se determinaron los parámetros óptimos del coagulante natural: dosis, concentración y pH, por cada nivel de turbidez; asimismo, el coagulante natural se comparó con el coagulante químico sulfato de aluminio respecto a la variación de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua: turbiedad, pH, color y conductividad. Los resultados indican que al aplicar el coagulante natural en la prueba de jarras se obtuvo un rango de remoción de turbiedad del 58% al 86%; asimismo, las dosis óptimas para muestras de 20, 50, 100, 300 y 500 UNT fueron 30, 45, 55, 75 y 90 mg/L, respectivamente. Para muestras de 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 niveles de turbiedad. Asimismo, se evidenció que el coagulante químico sulfato de aluminio es más eficiente en la remoción de turbidez que el cactus *Opuntia ficus-indica*, sin embargo, este último alcanzó 86% de remoción de turbidez en muestras de 500 UNT, comprobando su eficiencia en muestras de turbidez alta. Se 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 se 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.

Palabras clave: coagulación, coagulante natural, remoción de turbiedad, cactus *Opuntia ficus-indica*, prueba de jarras.

ABSTRACT

In the present study was evaluated the efficiency of *Opuntia ficus-indica* cactus when using it as a natural coagulant of vegetable type to remove the turbidity present in samples of synthetic water prepared in the laboratory, with values of initial turbidity of 20, 50, 100, 300 and 500 UNT; for this, were determined the optimal parameters of the natural coagulant: dose, concentration and pH, for each level of turbidity; likewise, the natural coagulant was compared with the chemical coagulant aluminum sulphate, with respect to the variation of the physicochemical parameters of the water samples: turbidity, pH, color and conductivity. The results indicate that when applying the natural coagulant in the jar test, was obtained a turbidity removal range of 58% to 86%; also, the optimal doses for samples of 20, 50, 100, 300 and 500 UNT were 30, 45, 55, 75 and 90 mg / L, respectively. The optimal concentration for samples of low turbidity (20-50 NTU) was 2%; for samples of medium turbidity (100-300 NTU) was 1%; and for samples of 500 UNT was 0.5%. The optimal pH was 9 for all levels of turbidity. Also, it was evidenced that the chemical coagulant aluminum sulfate is more efficient in the removal of turbidity than the cactus *Opuntia ficus-indica*, however, the latter reached 86% removal of turbidity in samples of 500 UNT, verifying its efficiency in samples of high turbidity. It was found that aluminum sulfate is superior in the removal of color, compared to natural coagulant, however, with aluminum sulfate a considerable increase in conductivity and decrease of pH in the samples was observed. When using the *Opuntia ficus-indica* cactus, no significant variations were found in the pH and final conductivity of the samples.

Key words: coagulation, natural coagulant, turbidity removal, *Opuntia ficus-indica* cactus, jar test.

I. INTRODUCCIÓN

El agua puede contener una variedad de sustancias solubles e insolubles, de estas últimas destacan las partículas coloidales, las cuales resultan difíciles de remover, por su tamaño pequeño (diámetro aproximado entre 1 y 1 000 milimicrómetros) y por la presencia de cargas eléctricas en su superficie que impiden que se aproximen entre ellas, haciendo que permanezcan estables en el medio que los rodea; por este motivo, es necesario que se agregue una sustancia que permita su desestabilización para que puedan ser removidas.

De acuerdo a Kirchmer (1983) la remoción de los coloides en el agua se basa en dos procesos: la coagulación y la floculación. La coagulación comienza en el instante que se añade una sustancia denominada “coagulante”, el cual desestabiliza las partículas coloides cancelando las fuerzas que los mantenían separadas; inmediatamente, se desarrolla la floculación, que consiste en el transporte de las partículas coloidales en el líquido para que hagan contacto entre ellas, lo que favorece su crecimiento y dan origen a un “flóculo” suficientemente grande y pesado, fácil de sedimentar.

Entre los coagulantes más usados de origen sintético se encuentra el sulfato de aluminio, sin embargo, en las últimas décadas se han realizado investigaciones para emplear coagulantes naturales en reemplazo de los coagulantes sintéticos, ya que estos últimos se encuentran asociados con el desarrollo de algunas enfermedades, como el alzheimer en el caso del aluminio (Olivero *et al.* 2013); así también, pueden generar grandes cantidades de lodos que al no ser utilizados como biosólidos, impactan negativamente los suelos y el agua (Miller *et al.* 2008; Yang *et al.* 2010).

Entre los coagulantes más usados de origen sintético se encuentra el sulfato de aluminio, sin embargo, en las últimas décadas se han realizado investigaciones para emplear coagulantes naturales en reemplazo de los coagulantes sintéticos, ya que estos últimos se encuentran asociados con el desarrollo de algunas enfermedades, como el alzheimer en el caso del aluminio (Olivero *et al.* 2013); así también, pueden generar grandes cantidades de

lodos que al no ser utilizados como biosólidos, impactan negativamente los suelos y el agua (Miller *et al.* 2008; Yang *et al.* 2010).

Por este motivo, se considera importante que se investiguen los coagulantes y floculantes de origen vegetal, a fin de contribuir a disminuir el uso de coagulantes sintéticos, y con ello sus efectos negativos. Asimismo, Olivero *et al.* (2013) señala que el uso de coagulantes naturales comprende algunas ventajas, entre ellas, indica que por ser sustancias consumibles no representan un riesgo tóxico a la salud, además, los lodos generados son altamente biodegradables y la cantidad producida es menor comparada con los lodos generados por coagulantes sintéticos; así también, el costo de elaboración y transporte de los coagulantes vegetales, es menor comparado con el costo de adquisición e importación del sulfato de aluminio.

De los coagulantes naturales de tipo vegetal que se han utilizado, se encuentran las semillas, papa, cactus, maíz, trigo y yuca, entre otros; de estos, el coagulante natural más conocido y estudiado es la semilla de *Moringa oleifera*. (Ledo *et al.* 2009); asimismo, algunos investigadores (Quirós *et al.* 2010; Fuentes *et al.* 2011; Feria *et al.* 2016; Yang *et al.* 2010; Jiménez *et al.* 2012) han experimentado con diferentes especies de cactáceas (*Opuntia spp*; *Subpilocereus repandus*; *Stenocereus griseus*; *Hylocereus cf. trigonus*) obteniendo buenos resultados en la clarificación del agua; sin embargo, Ramírez *et al.* (2011) recomienda que los futuros experimentos con coagulantes naturales deben involucrar variables como el pH, color, concentración del coagulante, aguas con más sólidos suspendidos, entre otros.

Por lo expuesto, el objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar la eficiencia de la cactácea *Opuntia ficus-indica* al usarla como coagulante natural de tipo vegetal para remover la turbiedad presente en las muestras de agua sintética preparadas en el laboratorio, y comprobar su efecto en la variación de los parámetros físicoquímicos; para lo cual, se preparó el coagulante en polvo obtenido del cactus *Opuntia ficus-indica*, a fin de determinar los parámetros óptimos (dosis, concentración y pH) del coagulante natural, y evaluar la variación de los parámetros físicoquímicos de las muestras de agua (turbidez, color, pH y conductividad) al emplear el coagulante natural, comparándolo con el coagulante químico sulfato de aluminio.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Partículas coloidales

El agua es un solvente universal porque puede disolver o dispersar la mayoría de sustancias y formar con ellas iones, complejos solubles e insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso (Vargas *et al.* 2004). Al respecto, Richter *et al.* (1984) ilustró el tamaño aproximado de las partículas presentes en el agua y su distribución, tal como se muestra en la Figura 1.

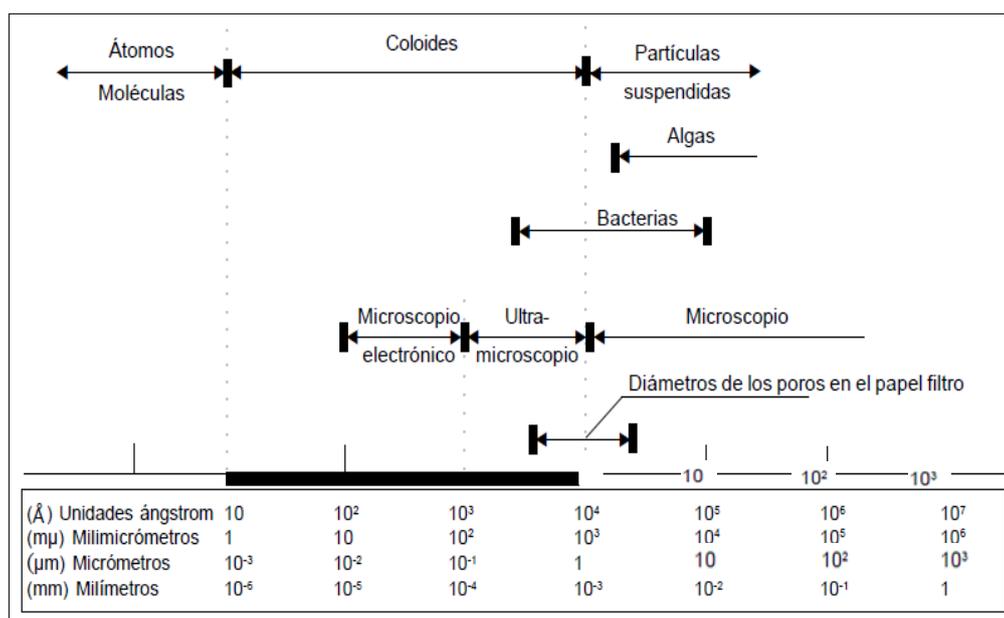


Figura 1: Distribución del tamaño de las partículas en el agua

A las partículas coloidales o coloides se les atribuye la turbiedad y el color del agua, presentan un diámetro aproximado entre 1 y 1 000 milimicrómetros y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Presentan una carga superficial, por lo general negativa, que impide que se aproximen entre ellas, y hace que permanezcan de manera estable y suspendidas en el líquido que los rodea. Por este motivo, para que sean removidas es preciso la adición de una sustancia denominada “coagulante”. (Vargas *et al.* 2004)

La estabilidad coloidal es afectada por los electrolitos del coagulante que alteran la carga superficial de los coloides, consecuentemente se consolidan agregados de mayor tamaño que precipitan por efecto de la gravedad; de esta manera, se remueve la turbiedad y el color, asimismo, también se da la eliminación de algas, bacterias, virus y organismos patógenos; así como, de sustancias productoras de sabor y olor. (Muñoz, citado por Molano 2011).

Asimismo, los coloides poseen una gran superficie específica que les da una gran capacidad de adsorción y, por tanto, no resulta práctico sedimentar las partículas coloidales sin tratamiento previo (Romero, citado por Molano 2000). Al respecto, en la Tabla 1 se puede ver el efecto de la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial y el tiempo de sedimentación requerido, donde se aprecia que la sedimentación de las partículas coloidales podría durar entre días y años,

Tabla 1: Efecto al disminuir el tamaño de las partículas

Diámetro de la partícula (mm)	Escala de tamaños	Área superficial total	Tiempo requerido para sedimentar
10	Grava	3.15 cm ²	0.3 seg
1	Arena gruesa	31.50 cm ²	3.0 seg
0.1	Arena fina	315.00 cm ²	38.0 seg
0.01	Sedimento	3 150.00 cm ²	33.0 min
0.001	Bacteria	3.15 m ²	55.0 horas
0.0001	Partícula coloidal	31.50 m ²	230.0 días
0.00001	Partícula coloidal	0.28 ha	6.3 años
0.000001	Partícula coloidal	2.83 ha	63.0 años

FUENTE: Richter *et al.* (1984)

Según Vargas *et al.* (2004) los tipos de coloides de acuerdo a su comportamiento en el agua pueden ser *hidrófobos* cuando repelen el agua, aunque estos no repelen completamente al agua; e *hidrófilos* cuando presentan afinidad con el agua. Asimismo, señala que en los sistemas coloidales hidrófobos, las propiedades de la superficie de las partículas son muy importantes. Las arcillas y algunos óxidos metálicos son coloides hidrófobos muy importantes en el tratamiento del agua. Por su parte, los coloides

hidrofílicos comprenden soluciones verdaderas, que abarcan polímeros tanto sintéticos como naturales y numerosas sustancias biológicas como proteínas, ácidos nucleicos, almidones y otras macromoléculas.

2.1.1 Propiedades de los coloides

Entre las propiedades que presentan las partículas coloidales o coloides, Richter *et al.* (1984) cita las siguientes:

- **Movimiento Browniano**

Consiste en el movimiento constante e irregular de los coloides, como resultado del choque desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del líquido. Este movimiento constante y desordenado les impide a los coloides sedimentar, aunque las partículas sean más densas que el líquido que las rodea; sin embargo, este movimiento solo puede explicar la estabilidad de las dispersiones coloidales más pequeñas.

- **Difusión**

El movimiento constante de las moléculas del líquido ocasiona que las partículas coloidales se encuentren en movimiento Browniano constante, lo que origina que estas tiendan a dispersarse por todas partes en el disolvente; sin embargo, la velocidad de difusión es menor que el movimiento Browniano.

- **Electrocinética**

Toda partícula coloidal está eléctricamente cargada, la carga varía su magnitud de acuerdo a la naturaleza del material coloidal y puede ser positiva o negativa. La estabilidad de los coloides depende de su carga eléctrica. Los de igual signo se repelen y no dejan formar aglomerados de muchas partículas. (García 2007, y Kirchmer 1983).

- **Presión osmótica**

Se refiere a la presión hidrostática necesaria para que el flujo osmótico (movimiento espontáneo del solvente hacia el sistema coloidal) se detenga y se alcance un estado de equilibrio.

- **Opalescencia:**

Las soluciones coloidales generalmente son incoloras; sin embargo, algunas pueden ser coloreadas, dependiendo de la diseminación de la luz y adsorción selectiva de cierta longitud de onda.

- **Efecto de Tyndall-Faraday**

Fenómeno por el cual las partículas coloidales provocan la dispersión de la luz cuando esta pasa a través de una suspensión coloidal, siendo esta dispersión directamente proporcional al tamaño de las partículas.

- **Superficie- adsorción:**

Las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica - definida como la relación entre el área superficial y la masa-, razón por la cual tienen una gran capacidad de adsorción, siendo la adsorción selectiva, la base fundamental de la estabilidad de algunas dispersiones coloidales.

2.1.2 Estabilidad de los coloides

De acuerdo a Kirchmer (1983) los sistemas coloidales están propensos a ser estabilizados y desestabilizados. En el primer caso, las fuerzas de estabilización o repulsión son: la carga de las partículas y la hidratación (en coloides hidrofílicos). En el segundo caso, las fuerzas de desestabilización o atracción, son: la gravedad, el movimiento Browniano, y las fuerzas de Van Der Waals, de las cuales, la fuerza de gravedad es insignificante en la desestabilización de las partículas coloidales. Asimismo, Andía (2000) señala que el

equilibrio de una suspensión coloidal depende de la fuerza resultante entre la fuerza de atracción y la fuerza de repulsión.

Considerando que las partículas coloidales tienen una carga eléctrica, los iones con carga contraria (contra-iones) del solvente son atraídos hacia la superficie de la partícula, este fenómeno unido a la agitación térmica de todo el sistema (difusión térmica), da lugar a una distribución de carga alrededor de la partícula coloidal cuya estructura adopta la forma de una *doble capa eléctrica* (Rodríguez 2006).

Según diferentes investigadores, el modelo que mejor explica el fenómeno de la doble capa eléctrica es la de Stern-Gouy. Mediante este modelo, la doble capa eléctrica, está constituida por dos regiones claramente diferenciadas, la primera región denominada *capa rígida o compacta* está más cerca a la superficie de la partícula, en la región de interfaz (sólido-líquido), es de poco espesor y está conformada por los contra-iones fuertemente adheridos a la partícula; la segunda región denominada *capa difusa* es una capa más extendida, en donde la difusión térmica de los iones en la solución y la atracción electrostática a la partícula coloidal, permiten una mayor dispersión iónica. (Rodríguez 2006, y Richter 1983).

Considerando que no se puede separar el coloide de los contra-iones que lo rodean, el único potencial que se puede determinar es el potencial en el plano de cizalla denominado, potencial zeta; siendo el plano de cizalla el que separa la sección de la capa que se mueve con la partícula coloidal formando parte integral de esta

En la Figura 2 se presenta el modelo de la doble capa de Stern-Gouy, el cual presenta tres tipos de potenciales, según el detalle:

- (i) El potencial de Nernst (Ψ_0) en la superficie coloidal
- (ii) El potencial phi (Ψ_ϕ) en el interior de la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa
- (iii) El potencial zeta (Ψ_z) en el plano de cizalla.

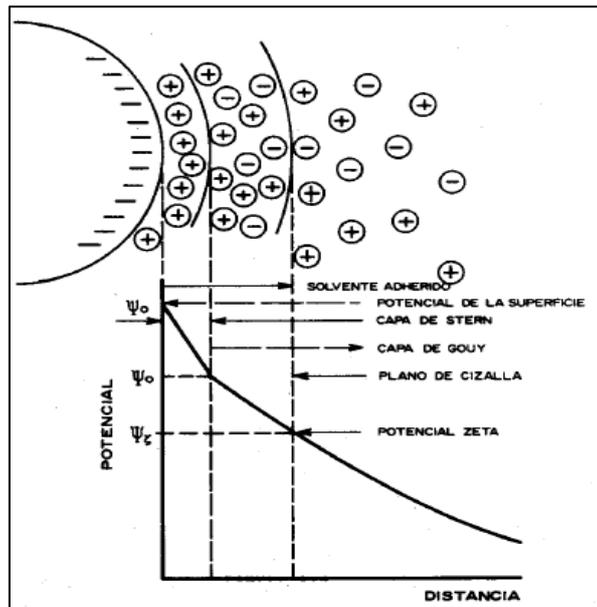


Figura 2: Modelo de la doble capa difusa de Stern-Gouy

2.2 Remoción de las partículas coloidales

De acuerdo a Kirchmer (1983) la acción que tienen los coagulantes en la remoción de los coloides se basa en dos procesos: la coagulación y la floculación. La coagulación comienza en el instante en que se agrega el coagulante y consiste en la desestabilización de los coloides mediante la remoción de las fuerzas que los mantenían separados; por su parte, la floculación se refiere al transporte de las partículas coloidales en el líquido para que hagan contacto y permitir su crecimiento, dando origen a un “flóculo” suficientemente grande y pesado, que puede sedimentar con facilidad.

Sin embargo, Weber (1979) también señala que los conceptos aceptados por los investigadores refiere que, al ser procesos simultáneos y siendo difícil de identificar el término de la coagulación y el inicio de la floculación, la coagulación puede aplicarse para el proceso global de agregación de partículas incluyendo la desestabilización y su transporte, mientras que la floculación solamente se emplea para describir el transporte de la partícula.

En la Figura 3 se puede ver cómo los coagulantes cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide permitiendo la aglomeración y la formación de flóculos, los cuales,

inicialmente son muy pequeños, pero se juntan y forman aglomerados mayores capaces de sedimentar.

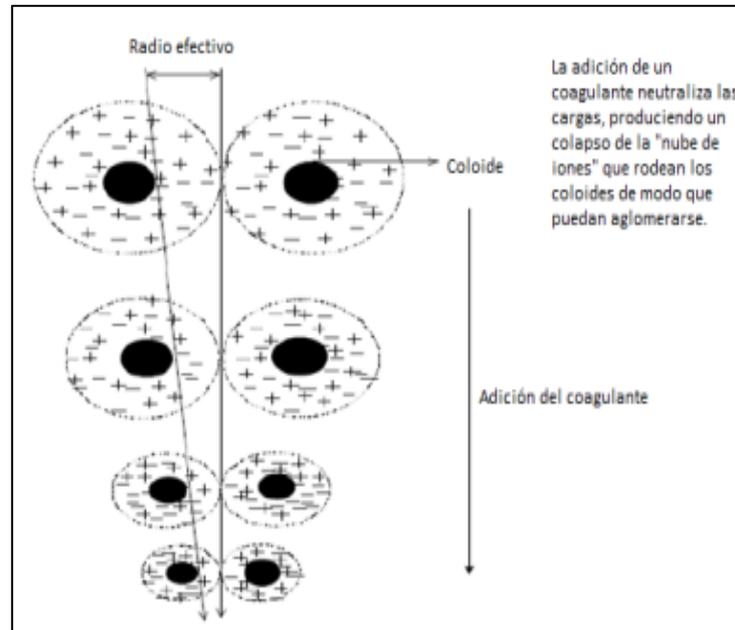


Figura 3: Desestabilización del coloide

Teniendo en cuenta lo mencionado, a continuación se describen ambos procesos, y se describen las etapas, tipos y factores relacionados con la coagulación:

2.2.1 Coagulación y floculación

La coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de reactivos llamados coagulantes y la aplicación de la energía de mezcla (Andía 2000). Asimismo, Richter (1983) resalta que del proceso de coagulación depende fundamentalmente la eficiencia de los procesos subsiguientes en el tratamiento del agua.

La floculación consiste en la aglomeración de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, mediante la agitación moderada del agua para formar partículas de mayor tamaño y peso específico superior al agua, denominados flóculos, a fin de que puedan sedimentar con facilidad (Rodríguez, citado por Restrepo 2009; y Andía 2000).

La floculación se favorece durante la mezcla lenta, lo que permite que los flóculos se junten, ya que una mezcla intensa podría romperlos. Asimismo, según Andía (2000), el proceso de floculación puede mejorarse con la adición de un reactivo de floculación o ayudante de floculación, en los casos que los flóculos formados por la aglomeración de varios coloides no sean lo que suficientemente grandes para sedimentar, por lo cual, al aplicar un floculante se forman puentes que permiten enlazar una superficie de otra, enlazando las partículas individuales en aglomerados.

Según Pérez *et al.* (1977) se tienen dos tipos de floculación: ortocinética y pericinéctica. La primera es inducida por fuerzas externas a la masa de agua, y puede ser de origen mecánico o hidráulico (paletas giratorias). La segunda es promovida internamente por el movimiento de agitación de las partículas (movimiento browniano), o por el peso de las partículas que tienden a aglomerarse.

2.2.2 Mecanismos de la coagulación

La coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales, consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma. Según Pérez (1977). La desestabilización se puede obtener por los mecanismos fisicoquímicos siguientes:

- Compresión de la doble capa.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente.

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 sólo con los iones del coagulante. Si la distancia que separa a las partículas es superior, entonces las partículas, no se atraen.

Existe por otro lado un potencial de atracción o fuerzas de atracción entre las partículas, denominadas fuerzas de Van der Waals, las cuales dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos últimos. Contrariamente a las Fuerzas de repulsión, las fuerzas de Van der Waals no son afectados por las características de la solución.

B. Absorción y neutralización de cargas

Las partículas coloidales poseen carga negativa en su superficie, estas cargas llamadas primarias atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide.

El potencial en la superficie del plano de cizallamiento es el potencial electrocinético potencial ZETA, este potencial rige el desplazamiento de coloides y su interacción mutua.

Después de la teoría de la doble capa, la coagulación es la considerada como la anulación del potencial obtenido por adición de productos de coagulación – floculación, en la que la fuerza natural de mezcla debido al movimiento browniano no es suficiente requiriéndose una energía complementaria necesaria; por ejemplo realizar la agitación mecánica o hidráulica.

Cuando se adiciona un exceso de coagulante al agua a tratar, se produce la re-estabilización de la carga de la partícula; esto se puede explicar debido a que el exceso de coagulante son absorbidos en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original.

C. Atrapamiento de partículas dentro de un precipitado

Las partículas coloidales desestabilizadas, se pueden atrapar dentro de un floc, cuando se adiciona una cantidad suficiente de coagulantes, habitualmente sales de metales trivalente como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, o Cloruro Férrico $FeCl_3$, el floc está formado de moléculas de $Al(OH)_3$ o de $Fe(OH)_3$. La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales acelera la formación del precipitado. Las

partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del floc; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. En otras palabras, una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menor cantidad de coagulante.

D. Adsorción y puente

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 muy largas contienen grupos químicos que pueden adsorber las partículas coloidales. La molécula de polímero puede así adsorber una partícula coloidal en una de sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para absorber otras partículas.

Por eso se dice que las moléculas de los polímeros forman el “puente” entre las partículas coloidales. Esto puede tener una re-estabilización de la suspensión, por una excesiva carga de polímeros.

2.2.3 Etapas de la coagulación

Según Richter (1984) y Andía (2000) el proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto, y en 5 fases de forma consecutiva y simultánea, según el detalle:

- **Fase 1:** Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- **Fase 2:** Formación de Compuestos químicos poliméricos.
- **Fase 3:** Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- **Fase 4:** Adsorción mutua de coloides.
- **Fase 5:** Acción de barrido.

En la Figura 4 se ilustra la secuencia de estas fases:

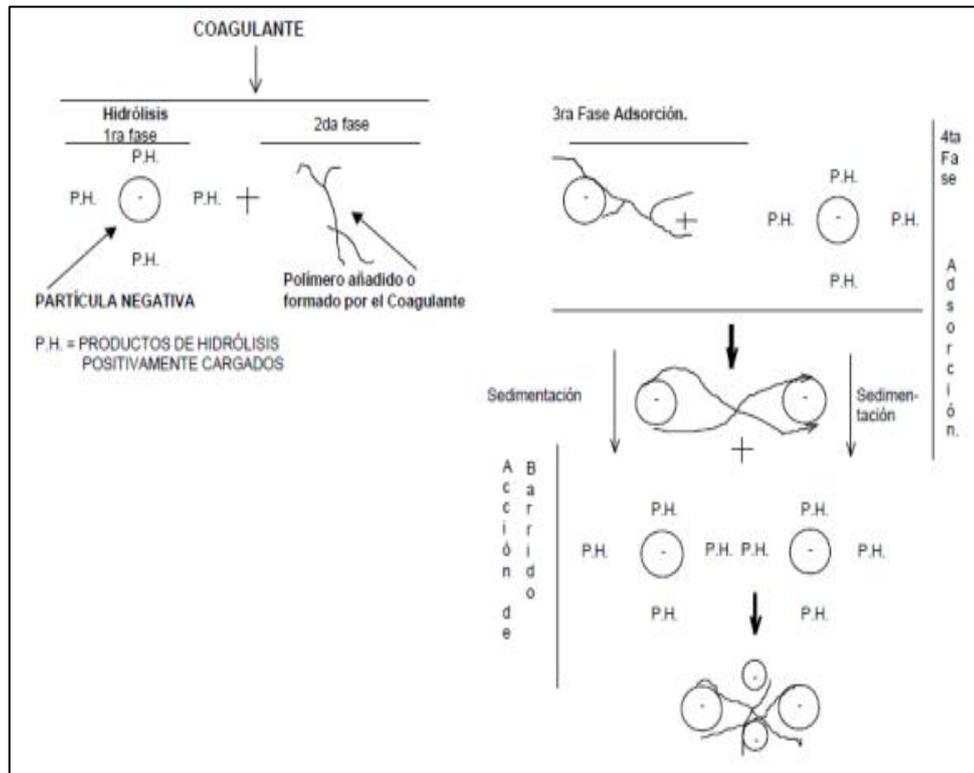


Figura 4: Etapas de la coagulación

2.2.4 Tipos de coagulación

Pérez *et al.* (1977) menciona 2 tipos básicos de coagulación: por adsorción y por barrido, los cuales se detallan a continuación:

A. Coagulación por adsorción

Este tipo se da cuando el agua presenta una alta concentración de partículas en estado coloidal, donde al aplicar el coagulante las especies hidrolíticas solubles son adsorbidas por los coloides formándose los flóculos en un tiempo muy corto, de forma casi instantánea.

La reacción inmediata se debe a la gran cantidad de partículas coloidales presentes, las cuales al encontrarse más próximas entre ellas tendrán una fuerza de atracción mayor, lo que favorecerá el proceso de coagulación.

En la Figura 5 se representa la adición de una solución de sulfato de aluminio a una muestra de agua muy turbia, y se desarrolla el mecanismo de adsorción.

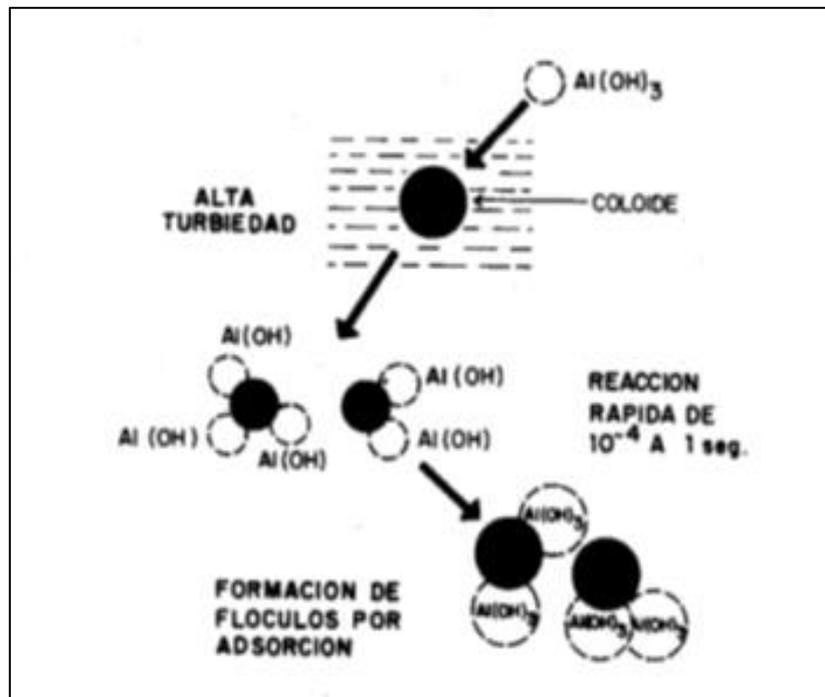


Figura 5: Coagulación de adsorción

Cuando se agrega sulfato de aluminio o sales de hierro al agua en condiciones especiales de dosis de coagulante y pH, se forman una serie de especies solubles hidrolizadas. Las especies hidrolizadas se adhieren o forman complejos superficiales con los grupos SILANOL (SiOH) y el coloide, y lo desestabilizan, permitiendo la formación de flóculos. Este mecanismo es denominado neutralización de carga (también se le llama de desestabilización-absorción).

Cuando la cantidad de coloides presentes en el agua es grande, la distancia entre ellos es pequeña, siendo por lo tanto mayor la fuerza de atracción y la energía requerida para su desestabilización menor, así como el potencial zeta resultante.

B. Coagulación por barrido

Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es de baja turbiedad y el porcentaje de partículas coloidales es pequeño. En este caso la coagulación se

efectuará porque las partículas serán enredadas al producirse una sobresaturación del coagulante añadido.

En este caso, debido a la distancia de las partículas, las fuerzas de atracción son menores, por lo cual, se requiere de una mayor cantidad de coagulante y energía para desestabilizarlas. En la Figura 6 se ilustra el proceso de coagulación por barrido al aplicar una solución de sulfato de aluminio

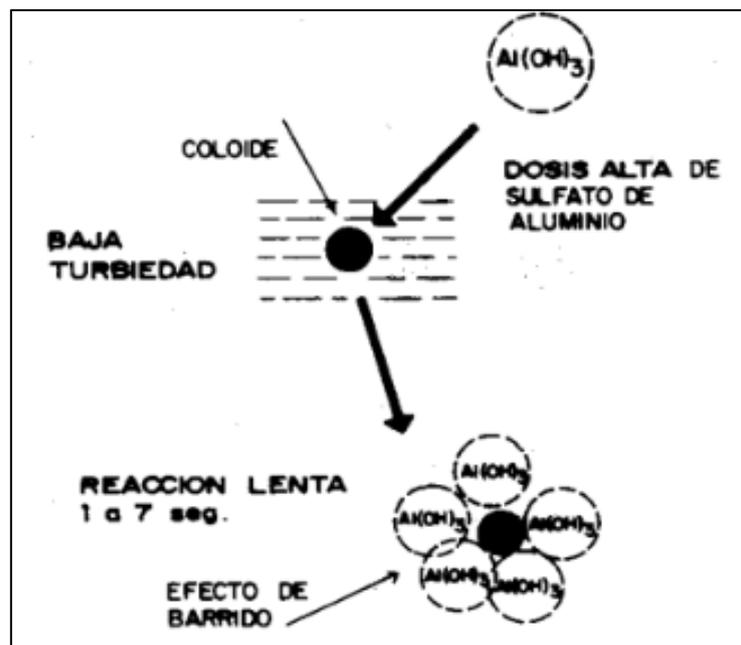


Figura 6: Coagulación de barrido

2.2.5 Factores que influyen en la coagulación

Según Andía (2000), Richter *et al.* (1984) y Pérez *et al.* (1977) se deben tener en cuenta los factores que influyen en el proceso de coagulación, con la finalidad de optimizarlo, asimismo, la interrelación entre cada uno de ellos permiten predecir cuáles son las cantidades de los coagulantes para adicionar al agua. Entre los factores que tienen una mayor influencia se encuentran los siguientes:

- **Temperatura**

Cahill y Fitz, citados en Pérez *et al.* (1977) analizaron la influencia de la temperatura en el proceso de coagulación, estableciendo dos regiones de variaciones muy

marcadas: una entre 0° - 10°C y la segunda entre 10° - 40°C. En la primera zona se determinó que a medida que el agua se acerca a 0°C la remoción de turbiedad disminuye, en estas condiciones se estaría impidiendo el acercamiento de las partículas para su desestabilización, asimismo, la viscosidad del agua se incrementa y con ello el transporte de las partículas coloidales se anula, por lo cual, la agitación exterior del agua no es suficiente para conseguir la aglomeración de las partículas pequeñas; además, el rango de pH óptimo también disminuye. Sin embargo, en la segunda región (10° - 40°C) determinaron que la eficiencia en la remoción de turbiedad mejoraba al aumentar la temperatura, debido al incremento de las colisiones de las partículas.

- **Dosis óptima**

La influencia de este factor se debe a la variación de la turbiedad residual en función a la dosificación del coagulante. Las curvas de coagulación pueden dividirse en cuatro zonas:

- **Zona 1:** La dosis de coagulante no es suficiente para desestabilizar las partículas y por lo tanto no se produce la coagulación.
- **Zona 2:** Al incrementar la dosis de coagulantes, se produce una rápida aglutinación de los coloides.
- **Zona 3:** Si se continúa incrementando la dosis, se pueden re-estabilizar los coloides con ciertos valores de pH.
- **Zona 4:** Al aumentar aún más la dosis, hasta producir una supersaturación se produce de nuevo una rápida precipitación de los coagulantes que hace un efecto de barrido, arrastrando en su descenso las partículas que conforman la turbiedad.

En la Figura 7 se representa esquemáticamente los tipos de zonas descritas, al aplicar una dosis de coagulante.

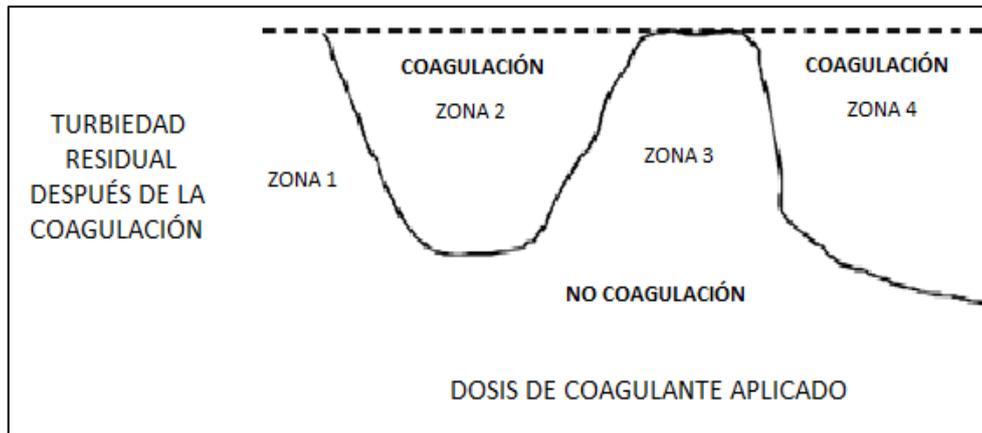


Figura 7: Zonas de coagulación

Asimismo, según Stumm y O'Melia, citados en Pérez *et al.* (1977) existe una relación entre la dosis de coagulante y la concentración coloidal, al respecto, cuando la turbiedad del agua es baja y no hay suficientes partículas en suspensión para producir el contacto necesario para la formación del floculo, se necesita mayores dosis de coagulante; mientras que para mayores concentraciones de coloide se necesitan menores dosis. En la Figura 8 se representa la relación entre la dosis de coagulante y la concentración coloidal:

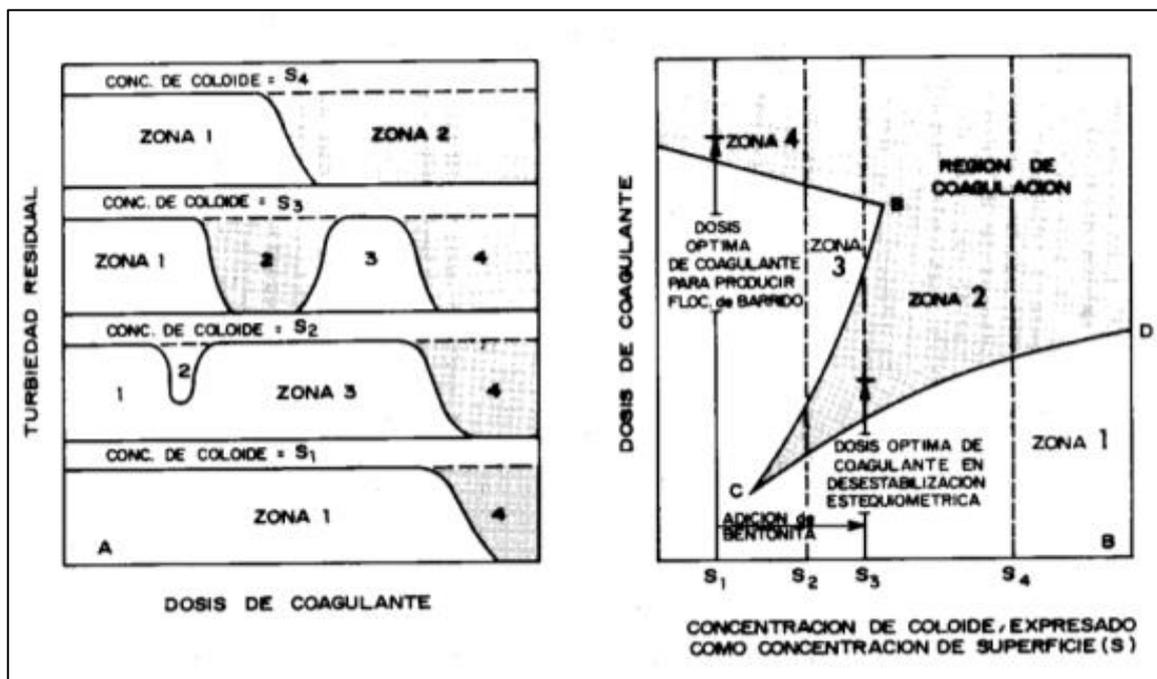


Figura 8: Relación de la dosis del coagulante y la concentración coloidal

- **pH óptimo**

El pH es un factor que influye en la coagulación. De acuerdo a las investigaciones realizadas se tiene que el pH óptimo para tratar aguas con color es más bajo (entre 4 y 6) que en agua con turbiedad (entre 6.5 y 8.5). Asimismo, se sabe que entre las sales férricas y las de aluminio, la primera son efectivas en un rango más amplio de pH.

- **Concentración óptima**

Para simular el proceso de coagulación de manera eficiente, se debe tener en cuenta que la cantidad de coagulante añadido es muy pequeña en comparación al volumen del agua a ser tratado, para lo cual, es necesario una suficiente turbulencia que asegure la dispersión del coagulante en toda la masa de agua para que entre más rápido y más fácilmente en contacto con el mayor número de partículas coloidales. Asimismo, soluciones muy diluidas pueden hidrolizarse antes de su aplicación, formando productos que no son favorables en el proceso de coagulación.

- **Alcalinidad**

La alcalinidad influye en la velocidad de reacción de los coagulantes, produciéndose reacciones lentas con baja alcalinidad (< 30 mg/L) e instantáneas con valores de alcalinidad superiores a 70 mg/L.

- **Mezcla y aplicación**

Entre los factores físicos que van a influir en el proceso de coagulación se encuentran: la intensidad de agitación, el tiempo de mezcla, el sistema de aplicación del coagulante, el punto de aplicación y el tipo de dispositivo de mezcla.

Para asegurar una coagulación homogénea se requiere de una intensa mezcla para distribuir uniformemente el coagulante a través del agua, de modo que el mismo entre en contacto con las partículas coloidales antes de que la reacción se complete;

asimismo, el punto de aplicación del coagulante debe ser donde se produzca la mayor turbulencia, por lo cual, debe evitarse aplicarse superficialmente.

2.3 Tipos de coagulantes

Entre los tipos de coagulantes utilizados en el tratamiento del agua, se tienen los siguientes:

2.3.1 Coagulantes sintéticos

Son utilizados para el tratamiento del agua de tipo industrial y doméstico, pero también para la eliminación de metales pesados, aceites, grasas, fosfatos, etc. (Nieto 2011). Entre los principales coagulantes químicos utilizados para desestabilizar las partículas y producir los flóculos son: sulfato de aluminio, aluminato de sodio, cloruro de aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso, polielectrolitos (como ayudantes de floculación). Siendo los más utilizados las sales de aluminio y de hierro (Andía 2000 y Ritcher 1994). En la actualidad, el uso de polímeros como ayudantes de coagulación y floculación está bastante extendido y es práctica común en muchas plantas de tratamiento de agua, principalmente de países industrializados (Laines *et al.* 2008).

2.3.2 Coagulantes naturales

Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal (Kawuamura 1991; Lee *et al.* 1995; Ganjidoust *et al.* 1997; Broekaert *et al.* 1997, citados por García 2007), que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbidez inicial de ésta. Algunos de estos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades. Su origen natural, garantiza la inocuidad para el ser humano, y la biodegradabilidad de los lodos producidos permite además su utilización en la agricultura. Su aplicación, no solo puede ir dirigida a países en vías de desarrollo, sino también a potabilización convencional y al tratamiento de aguas residuales (Arboleda 2000).

En Jahn (1998) citado por García (2007), publicó una lista de coagulantes naturales de origen vegetal que adicionalmente se habían utilizado en África subsahariana, la India y América del Sur. Entre ellos, se encontraban las semillas de almendra, albaricoque, melocotón, Cactus *Opuntia*, legumbres, guisantes, lentejas, nueces, habas, guar y *Moringa oleifera*.

Algunos de ellos han sido estudiados con mayor profundidad, proporcionando resultados positivos en relación a su actividad coagulante. De todos los coagulantes naturales, el coagulante primario de origen vegetal más conocido y estudiado en la actualidad es la semilla de *Moringa oleifera*. Algunas investigaciones sugieren que para aguas de baja turbiedad, sus semillas pueden ser un sustituto potencialmente viable del sulfato de aluminio para la clarificación de las aguas (Ledo *et al.* 2009)

Dentro de algunos coagulantes alternativos empleados en América Latina, están papa, cactus, maíz, trigo y yuca, que han sido utilizados en la clarificación de agua, dentro de la extensa gama de productos estudiados hasta la actualidad en el mundo (Ledo *et al.* 2009).

Así también, en el trabajo de Carpinteyro (2011), se demuestra la aplicabilidad de biopolímeros (goma guar, algarrobo, mezquite y mucílago de nopal) en la coagulación y floculación tanto de agua residual municipal como de agua residual industrial con carga orgánica alta.

De otro lado, la importancia en la selección del coagulante y la dosis óptima se debe a que determinará la buena o mala calidad del agua clarificada y el buen o mal funcionamiento de los procesos posteriores en el tratamiento del agua (Andía 2000; y Guzmán *et al.* 2013).

De acuerdo a Van Benchosten *et al.* (1990), Boisvert *et al.* (1997) y Najm *et al.* (1998), citado por García (2007), el uso de coagulantes de origen sintético para la potabilización, tales como el sulfato de aluminio o el cloruro férrico, es cuestionada debido entre otros motivos a que se encuentra relacionada con:

- Problemas medioambientales que conlleva fundamentalmente a la generación de lodos tóxicos que no pueden ser utilizados en la agricultura.

- Relación con la enfermedad de Alzheimer.
- Empeoramiento de enfermedades neurodegenerativas.
- Relación con el cáncer.

Con lo señalado se advierte que se ha relacionado la existencia de algunas enfermedades con la presencia de aluminio residual en el agua potable, por lo cual, existe un interés global por investigar coagulantes sustitutos de los actuales, que sean más seguros para el ser humano.

De todos los coagulantes naturales, el coagulante primario de origen vegetal más conocido y estudiado en la actualidad es la semilla de *Moringa Oleifera*. Algunas investigaciones sugieren que para aguas de baja turbiedad, sus semillas pueden ser un sustituto potencialmente viable del sulfato de aluminio para la clarificación de las aguas (Ledo *et al.* 2009).

Sin embargo, el principal inconveniente que presentan los coagulantes naturales, es que cuando se adicionan al agua pulverizadas, incrementan la carga orgánica de manera significativa, añadiendo hasta un 90% de sustancias orgánicas que no actúan como agentes floculantes (Jahn 1988; Ndabigengesere *et al.* 1995; Okuda *et al.* 2001a, citado por García 2007). El agua tratada con tuna dejó un valor de DQO residual del doble con relación al tratamiento convencional con sulfato de aluminio (Jiménez *et al.* 2012).

A pesar de ello, en los últimos años se estudia la efectividad de los coagulantes naturales en comparación con el sulfato de aluminio y su aplicación a escala piloto en sistemas de coagulación-floculación-filtración (Raghuwanshi 2002, citado por García 2007), en sistemas comunitarios de potabilización en comunidades rurales (Jahn 1986; Folkard *et al.* 1990, citado por García 2007) y en filtración directa (AlKhalili *et al.* 1997, citado por García 2007) con lechos filtrantes duales compuestos por *Strychnospotatorumy Moringa Oleifera* o de arroz (Barnes *et al.* 1983, citado por García 2007).

Además de su aplicación en clarificación y potabilización de aguas crudas, se ha estudiado la aplicación de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas residuales procedentes de

la industria textil (Vasudevan *et al.* 2002, citado por García 2007), de industrias de extracción de aceite de oliva (Meysami *et al.* 2005, citado por García 2007), en aguas con elevado contenido de metales pesados como el cadmio (Sharma *et al.* 2006, citado por García 2007) o en deshidratación de lodos (Özacar *et al.* 2000, citado por García 2007) obteniéndose resultados positivos.

2.4 Ensayo de la prueba de jarras

Esta prueba es la más representativa para determinar el comportamiento de los coagulantes y simular las condiciones del proceso de coagulación en una planta de tratamiento, permitiendo determinar el tipo y dosificación del coagulante, pH óptimo, tiempo y velocidad de mezclado, para que de esa forma se pueda estimar la dosis óptima del coagulante requerido para tratar el agua.

El procedimiento consiste en añadir concentraciones del coagulante en los vasos precipitados que contienen muestras de agua a diferentes turbiedades. Al mismo tiempo, los vasos están expuestos a una agitación rápida para homogenizar el medio, y en seguida, a una agitación lenta para favorecer la formación del flóculo. Finalmente la agitación termina y se entra a un estado de reposo para luego analizar las muestras de agua (Andía 2000, y Nieto 2011).

2.5 Parámetros Físicoquímicos del agua

Vargas *et al.* (2004) menciona que las características físicas del agua, denominadas así por impresionar los sentidos, tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua. Entre estas características considera importantes las siguientes: turbiedad, color, olor y sabor, temperatura, sólidos solubles e insolubles, y pH.

A continuación se detallan los parámetros físicoquímicos medidos en el presente trabajo de investigación, cuyas definiciones se han extraído de Vargas *et al.* (2004):

2.5.1 Turbiedad

La turbiedad es originada por las partículas en suspensión o coloides, como arcillas, limo, tierra finamente dividida, entre otros; por lo cual, se puede afirmar que la turbiedad es causada por las partículas que forman los sistemas coloidales, las cuales, por encontrarse suspendidas reducen la transparencia del agua.

La medición de la turbiedad se realiza mediante un turbidímetro o nefelómetro. Las unidades utilizadas son, por lo general, Unidades Nefelométricas de Turbiedad (UNT).

En las plantas de tratamiento de agua, la remoción de la turbiedad no es un proceso difícil, sin embargo, por lo general, requiere usar coagulantes, acondicionadores de pH, ayudantes de coagulación, entre otros.

Aunque no se conocen los efectos directos de la turbiedad sobre la salud, esta afecta la calidad estética del agua, lo que puede ocasionar el rechazo de los consumidores; así también, diversos estudios realizados por Tracy, Sanderson y Kelly, citado por Vargas *et al.* (2004) indican las partículas causantes de la turbiedad reducen la eficiencia del proceso de desinfección en la eliminación de organismos patógenos, al proteger físicamente a los microorganismos del contacto directo con el desinfectante. Por este motivo, se considera importante que la turbiedad debe mantenerse mínimo para garantizar la eficacia del proceso de desinfección.

Los estándares internos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) establecen que las aguas de consumo humano deben tener preferentemente 1 UNT y no debe exceder 5 UNT. Asimismo, las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan como valor guía 5 UNT; sin embargo, también indica que para una desinfección eficiente, el agua filtrada debería tener una turbiedad promedio menor o igual a 1 UNT.

Asimismo, en el Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano, aprobado con Decreto Supremo n° 031-2010-SA de 24 de setiembre de 2010, se establece que el límite máximo permisible de la turbiedad en aguas para consumo humano es 5 UNT.

2.5.2 Color

El color del agua se atribuye comúnmente a la presencia de taninos, lignina, ácidos húmicos, ácidos grasos, ácidos fúlvicos, entre otros. Asimismo, se considera que el color natural del agua, excluyendo el que resulta de descargas industriales, puede originarse por las siguientes causas o la combinación de estas:

- Extracción acuosa de sustancias de origen vegetal

- Descomposición de la materia

- Materia orgánica del suelo

- Presencia de hierro, manganeso y otros compuestos metálicos

En la formación del color en el agua intervienen, entre otros factores, el pH, la temperatura, el tiempo de contacto, la materia disponible y la solubilidad de los compuestos coloreados.

Existen muchos métodos de remoción del color. Los principales son la coagulación por compuestos químicos a pH bajos, y las unidades de contacto o filtración ascendente. Asimismo, teniendo en cuenta que el color del agua en muchos casos se origina por la presencia de compuestos orgánicos, se recomienda que la desinfección se realice luego de que el color haya sido removido, para evitar que la aplicación de cloro como desinfectante pueda dar origen a la formación de trihalometanos, compuestos que tienen efecto cancerígeno en animales.

El valor guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) es 15 Unidades de color (UC) para aguas de bebida; mientras que en el Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano, aprobado con Decreto Supremo n° 031-2010-SA de 24 de setiembre de 2010, se establece que el límite máximo permisible del color en aguas para consumo humano es 15 UCV escala Pt/Co.

2.5.3 Conductividad

La conductividad es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica, considerando que el agua pura se comporta como aislante eléctrico, son las sustancias que se encuentran disueltas las que proporcionan al agua la capacidad de conducir la corriente eléctrica, por lo cual, esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como la temperatura de la medición. (Espinoza *et al.* 2014)

La conductividad es una medida indirecta de la cantidad de sólidos disueltos en el agua, de ahí su importancia, ambos valores se encuentran relacionados mediante la siguiente expresión empírica.

$$SD_{(mg/L)} = 0.8 \times \Lambda o_{(\mu S cm^{-1})}$$

De acuerdo a Espinoza *et al.* (2014), las moléculas de los compuestos orgánicos que no se disocian en soluciones acuosas tienen una conductividad muy escasa o nula, asimismo, señala que por lo general los valores de conductividad en cuerpos de agua superficiales oscilan entre 700 μ hos/cm a 1200 μ hos/cm.

2.5.4 pH

El pH no tiene efectos directos sobre la salud, sin embargo, puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección.

Por lo general, las aguas naturales no contaminadas exhiben un pH en el rango de 5 a 9; en el caso, que se traten aguas ácidas con valores de pH bajo, por lo general se adiciona un álcali (por lo general, cal) para optimizar el proceso de coagulación.

Asimismo, se considera que el pH de las aguas tanto crudas como tratadas debería estar entre 5 y 9; ya que en este rango se puede controlar el efecto del pH en el comportamiento de otros constituyentes del agua.

En el Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano, aprobado con Decreto Supremo n° 031-2010-SA de 24 de setiembre de 2010, se establece que el límite máximo permisible del pH en aguas para consumo humano se debe encontrar en el rango de 6.5 a 8.5.

2.6 Cactus *Opuntia ficus-indica*

Las cactáceas o cactus son endémicos del continente Americano. Dentro de nuestro territorio existe una gran variedad de climas, temperaturas y altitudes a las cuales los cactus se han adaptado en millones de años para sobrevivir y eso explica las muchas formas, tamaños y texturas que presentan los cactus. De los múltiples géneros de cactáceas, el *Opuntia* cuenta con 258 especies reconocidas, las cuales, además de encontrarlas en América, también son cultivadas en Italia, España y Sudáfrica. (Ostolaza 2011).

La *Opuntia ficus indica*, más conocida como tuna, pertenece a la subfamilia Opuntioideae, es la especie más conocida y de mayor valor económico; aunque es oriunda de México, se cultiva en muchos países. En el Perú este cactus se cultiva en varias regiones, incluyendo Lima, en pequeña escala para el consumo local, y como hospedero de la “cochinilla”. Las Opuntias también se emplean para consumo humano, como forraje para el ganado, y en la elaboración de cosméticos. (Ostolaza, 2014). Es una planta que puede sobrevivir en temperaturas extremas y sequía, además tiene una gran capacidad para almacenar el agua gracias al contenido de mucílago en sus tejidos. (Sáenz 1997, citado en Monserrat 2012). Asimismo, Ostolaza (2014) señala que es muy probable que el *Opuntia ficus indica* haya sido introducida en el Perú por los españoles durante la colonia, ya que ningún cronista la menciona como nativa; asimismo, la describe de la siguiente manera:

Opuntia ficus-indica (Linneo) Miller, Gard. Dict. Ed 8 (2), 1768.

“Plantas arbustivas a arborescentes, 1.70 a 3.0 m de altura, con un tallo primario lignificado, bien definido, castaño oscuro, verde o gris, cilíndrico, de 45 cm. de largo, 20 cm. de diámetro. Cladodios usualmente elípticos, u obovados, ovados, circulares, oblongos, oblongolados o romboidales, 30 a 40 cm. de largo, 20 a 25 cm. de ancho, 2.0 a 2.5 cm. de grosor. Areolas 6 a 19 por cladodio, 2 a 8 mm de largo. Espinas usualmente ausentes, o 1a 6, de 0.5 a 3 cm., blanca, gloquidios abundantes en areolas, flores de ántesis diurna, hasta 10 por cladodio, en la parte

apical del margen del cladodio, amarillo brillante, 6 a 8 cm. de largo, 6 a 10 cm. de diámetro, filamentos blancos o amarillos, estigma verde o amarillo, con 8 a 10 lóbulos. Fruto esférico, cilíndrico o elíptico, 6 a 10 cm. de largo, 4 a 7 cm. de diámetro, amarillo o rojo, umbilicado, pulpa del color de la cáscara, pulposa, jugosa y dulce. Semillas duras, lenticulares a elipsoidales, 200 a 300 por fruto, 4 a 4.5 mm de largo, 3.2 a 3.8 mm de ancho, 1.2 a 1.6 mm de grosor”.

A continuación se cita la descripción morfológica del *Opuntia ficus-indica* de acuerdo al manual “Cultivo de Tuna” *Opuntia ficus-indica* de la Gerencia Regional Agraria La Libertad (2009):

- **Tallo**

La tuna es un vegetal arborescente de 3 a 5m de alto, su tronco es leñoso y mide de entre 20 a 50cm de diámetro. En el Perú las variedades más usuales desarrollan portes de aproximadamente 1.5 a 2 m de altura. El tallo, a diferencia de otras especies de cactáceas, está conformado por un tronco y ramas aplanadas que posee cutícula gruesa de color verde de función fotosintética y de almacenamiento de agua en los tejidos.

- **Cladodios**

Forma pencas denominadas cladodios de 30 a 60 cm. de largo x 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor. Sus ramas están formadas por pencas de color verde opaco con areolas que contienen espinas más o menos numerosas de color amarillas. Estas estructuras transforman la luz en energía química a través de la fotosíntesis y están recubiertos por una cutícula del tipo lipídica, interrumpida por la presencia de estomas, los mismos que permanecen cerrados durante el día. La cutícula del cladodio evita la deshidratación provocada por las altas temperaturas del verano. La hidratación normal del cladodio alcanza hasta un 95% de agua en peso. Las pencas y tallos tienen espinas. El sistema radicular es profundo; no obstante, dependiendo de la humedad ambiental, pueden desarrollar raíces laterales superficiales.

- Hojas

Solo en cladodios internos, transformadas en espinas en forma de garra, engrosadas en su base, para defensa; las caducas sólo se observan sobre tallos tiernos. Cuando se produce la renovación de pencas, en cuyas axilas se hallan las aréolas de las cuales brotan las espinas, de aproximadamente 4 a 5 mm de longitud. Las hojas desaparecen cuando las pencas han alcanzado un grado de desarrollo y en cuyo lugar quedan las espinas.

En la Figura 9 se muestra una imagen del cactus *Opuntia ficus-indica*, del libro *The New Cactus Lexicon* (Fotografía 508.5), perteneciente a la provincia de Huancabamba, del departamento de Piura, Perú, a 1 750m, tomada el 8 de noviembre de 2003.



Figura 9: Imagen *Opuntia ficus-indica*

Estudios fitoquímicos realizados al *Opuntia ficus-indica* han indicado la presencia de proteínas, carbohidratos y metabolitos secundarios (saponinas y flavonoides), así como, la ausencia de taninos y alcaloides (Kiesling *et al.* 2005, y Vásquez 1994, citados por Villabona *et al.* 2013).

En la Tabla 2 se muestra la comparación del análisis fitoquímico del cactus *Opuntia-ficus indica* realizado por tres investigadores, en el cual se advierte que el mayor porcentaje de su composición corresponde al agua almacenada en sus tejidos, representando 90% de humedad.

Tabla 2: Análisis fitoquímico del cactus *Opuntia-ficus indica*

Parámetro	Valor	Referencia
pH	4.42	Rodríguez et al. (2007)
	4.25	Villabona <i>et al.</i> (2013)
Humedad (%)	90.83	Vásquez (1994)
	90.23	Villabona <i>et al.</i> (2013)
Calcio (%)	2.71	Vásquez (1994)
	1.35	Rodríguez et al. (2007)
	0.27	Villabona <i>et al.</i> (2013)
Hierro (ppm)	42.67	Vásquez (1994)
	12.35	Rodríguez et al. (2007)
	32.55	Villabona <i>et al.</i> (2013)
Flavonoides (mg/g)	5.23	Vásquez (1994)
	10.16	Villabona <i>et al.</i> (2013)
Saponinas (mg/g)	0.56	Vásquez (1994)
	0.70	Villabona <i>et al.</i> (2013)

FUENTE: Vásquez (1994); Rodríguez et al. (2007); Villabona *et al.* (2013).

Asimismo, Villabona *et al.* (2013) realizó una caracterización de las propiedades del coagulante en polvo, las cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Propiedad del polvo de cactus *Opuntia ficus-indica*

Parámetro	Valor
pH	6.19
Estado físico	sólido
Color	blanco marfil
Nitrógeno X 6.35 (%)	7.39
Carbohidratos	58.77
Densidad (g/mL)	0.626

FUENTE: Villabona *et al.* (2013)

Al respecto, Villabona *et al.* (2013) concluye que las proteínas, saponinas, flavonoides, sales minerales de calcio y hierro presentes en la planta, no son los responsables de su

poder coagulante, debido a las pequeñas proporciones encontrados; sin embargo, indica que tal como refieren Yang (2008), Almendárez (2004) y Arboleda (1992), el alto contenido de carbohidratos puede favorecer la coagulación.

Según Saag *et al.* (1975), citado por Guzmán *et al.* (2013), el género *Opuntia* (familia cactaceae), se caracteriza por la producción de un hidrocoloide, conocido como mucílago, el cual, forma redes moleculares que pueden retener grandes cantidades de agua. El mucílago se conforma por diferentes tipos de polisacáridos, que son parte de los elementos estructurales del sistema celular de las plantas (Parra *et al.* 2011).

La estructura del mucílago del género *Opuntia* es altamente ramificada (Medina *et al.* 2000, citado por Guzmán *et al.* 2013) y según la especie contiene proporciones variables de L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa, y el ácido galacturónico, siendo este último su componente principal (Parra *et al.* 2011; y Trachtenberg *et al.* 1981; Henríquez *et al.* 2009; Moreno *et al.* 2008; Goycoolea *et al.* 2010; citado por Guzmán *et al.* 2013). Al respecto, Miller (2008) afirma que al añadir de manera independiente el ácido galacturónico a muestras de agua, fue capaz de reducir la turbidez en un porcentaje mayor al 50%, por lo cual, señala que pueden haber otros componentes adicionales que se encuentren en el mucílago y que contribuya al proceso de coagulación, siendo necesario la ejecución de más estudios para determinar dichos componentes.

Asimismo, por las propiedades de este mucílago, diferentes autores, entre ellos Miller (2008) han propuesto el mecanismo de adsorción y formación de puente, mediante el cual operan las especies del género *Opuntia spp.* en el proceso de coagulación, ya que, las moléculas del polímero pueden ser suficientemente largas y flexibles para ser adsorbidas sobre diversas partículas coloidales, lo cual se ha comprobado con la formación de flóculos ramificados y no esféricos (Parra *et al.* 2011), por lo cual, Miller (2008) sugiere que la adsorción se produce a través de enlaces de hidrógeno o interacciones dipolo, siendo probable que los electrolitos naturales del *Opuntia spp.*, en especial cationes divalentes (polímeros aniónicos importantes para la coagulación), faciliten la adsorción en las partículas coloidales.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

En este apartado se mencionan los materiales de laboratorio, equipos e insumos empleados en el presente trabajo de investigación.

3.1.1 Materiales de laboratorio

- Vasos de precipitado (1 L, 100 mL, 200 mL)
- Buretas
- Pipetas
- Mortero manual
- Tamiz
- Matraz
- Otros: bagueta, piseta, jeringas de 10 mL, tomadores de muestra (flotadores de tecnopor con sifones), guantes, papel tissue, papel filtro, baldes, cuchillo, bandejas.

3.1.2 Equipos

- Equipo de Prueba de Jarras
- Turbidímetro
- Potenciómetro
- Conductímetro
- Colorímetro
- Equipo de Soxhlet
- Agitador magnético
- Balanza analítica
- Estufa
- Triturador

3.1.3 Insumos

- Agua destilada
- Arcilla Bentonita
- Pencas de tuna
- Sulfato de Aluminio tipo B ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$)
- Alcohol etílico al 96%
- Reactivo ácido sulfúrico 0.1 N
- Reactivo hidróxido de sodio 0.1 N

3.2 Metodología experimental

Los procedimientos ejecutados para medir la eficiencia del coagulante natural hecho a base del cactus *Opuntia ficus-indica*, se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ciencias y la Facultad de Industrias Alimentarias, de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

A continuación se detallan los procedimientos realizados:

3.2.1 Preparación de las muestras de agua sintética

De acuerdo a lo señalado por Andía (2000) la fuente de abastecimiento de la Planta de Tratamiento de Agua para consumo humano “La Atarjea”, es el río Rímac, cuyo valor promedio de turbiedad en épocas de lluvia y estiaje es de 300 NTU y 15 NTU, respectivamente.

Considerando la referencia mencionada, y a fin de evaluar el efecto del coagulante natural (cactus *Opuntia ficus-indica*) en un rango de turbidez con niveles bajos, medios y altos, se optó por preparar muestras de agua con 5 niveles, seleccionando los siguiente valores: 20, 50, 100, 300 y 500 UNT.

Para ello, se adaptó la metodología empleada por Sciban *et al.* (2009), citado por López *et al.* (2011), quien preparó una “solución patrón” compuesta por arcilla disuelta en agua destilada, a partir de la cual realizaron disoluciones hasta lograr el nivel de turbidez deseado.

En referencia a dicha metodología, se pesó 100 g de arcilla bentonita, la cual, se enrasó con agua destilada en una jarra de dos litros, esta solución se mezcló durante media hora utilizando un agitador magnético a 30 RPM. La mezcla homogénea se dejó reposar por 48 horas. Pasado este periodo, se recolectó la solución con arcilla, separándola del material particulado que había sedimentado.

De la solución de arcilla preparada denominada “solución patrón”, se realizaron diluciones con agua destilada hasta alcanzar el nivel de turbiedad deseado (20, 50, 100, 300 y 500 UNT), y de esa manera, obtener las muestras de agua para experimentar con el equipo de prueba de jarras. En la Figura 10 se muestran las diluciones preliminares preparadas a partir de la solución patrón.

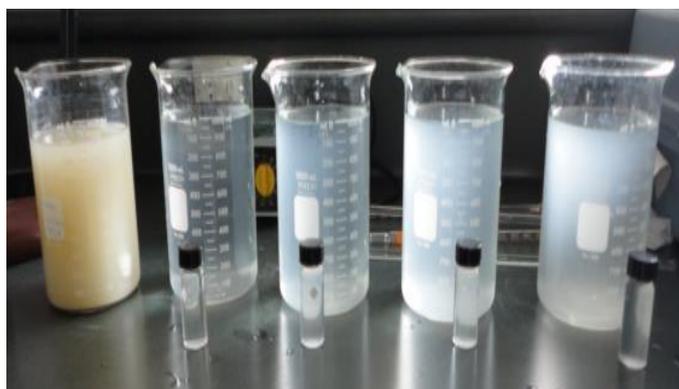


Figura 10: Preparación de las muestras de agua

3.2.2 Preparación del coagulante natural

Al revisar las investigaciones de Martínez *et al.* (2003), Fuentes *et al.* (2011), y Villabona *et al.* (2013), quienes utilizaron diferentes especies de cactáceas para clarificar el agua, se advierten algunas diferencias en las metodologías propuestas para la preparación del coagulante natural; considerando ello, se consideró preparar el coagulante natural según la metodología propuesta por Villabona *et al.* (2013), ya que este autor obtuvo mejores resultados en la remoción de turbiedad del agua.

Asimismo, se debe precisar que las pencas de cactus *Opuntia ficus-indica* se adquirieron en el distrito de San Bartolomé, provincia de Huarochirí, departamento de Lima, ubicado a

una altitud de 1 600 m.s.n.m., a la altura del Kilómetro 56 de la Carretera Central. En la Figura 11 se aprecian las pencas de cactus recolectadas.



Figura 11: Pencas de cactus *Opuntia ficus-indica* recolectadas

La metodología ejecutada para la obtención del cactus natural hecho a base del cactus *Opuntia ficus-indica* se detalla a continuación:

- Reducción

Se quitaron las espinas y capa externa (epidermis) de las pencas del cactus, a fin de separar la pulpa, la cual se lavó y cortó en trozos rectangulares alargados. En la Figura 12 se aprecian las pencas peladas y trozadas en tiras.



Figura 12: Reducción de la pulpa de cactus

- Secado

La pulpa en trozos se sometió a un proceso de secado, puestas en una estufa a una temperatura de 60°C por 3 horas. En la Figura 13 se aprecia la pulpa de cactus trozada, y en la Figura 14 se muestran las tiras de cactus deshidratadas.



Figura 13: Tiras de cactus antes del proceso de secado



Figura 14: Tiras de cactus deshidratado

- Molienda y tamizado

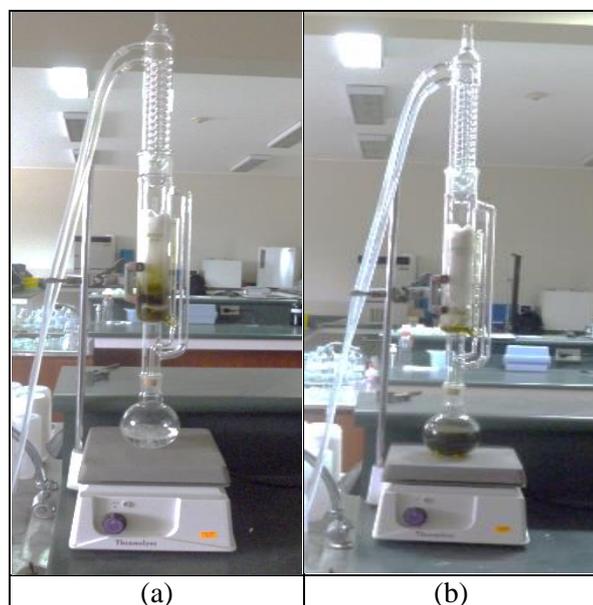
Las tiras cuadradas de cactus deshidratadas se trituraron utilizando un triturador hasta obtener un material granulado, el cual fue cernido con tamices Tyler (malla #100) hasta obtener partículas muy finas. En la Figura 15 se observa el material particulado tamizado.



Figura 15: Polvo de cactus *Opuntia ficus-indica* matizado

- Extracción de pigmento

El polvo obtenido se sometió a un proceso de extracción Soxhlet durante 2.5 horas utilizando etanol al 96% como solvente. Al final del proceso de extracción se observó que el solvente, por estar en contacto con el material granulado, adquirió una coloración de incolora a verde oscura debido a la extracción de los pigmentos del cactus solubles en alcohol, tal como se aprecia en la Figura 16; de otro lado, el polvo de cactus obtuvo un color blanco.



**Figura 16: Extracción de los pigmentos del cactus
(a) Inicio del proceso de extracción; (b) Término del proceso de extracción**

- Almacenamiento

El polvo de cactus se secó a temperatura ambiente y se almacenó en el desecador hasta su uso. En la Figura 17 se observa el coagulante en polvo obtenido del cactus *Opuntia ficus-indica*.



Figura 17: Coagulante en polvo obtenido del cactus *Opuntia ficus-indica*

Para probar el coagulante natural en la prueba de jarras, 24 horas antes de su uso se preparó el coagulante al 10%, para ello, se pesó 100 g del polvo de cactus y se diluyó en 1L de agua destilada, utilizando un matraz aforado; asimismo, para homogenizar esta solución, se utilizó un agitador magnético.

La solución del coagulante natural al 10% de concentración, la cual tiene pH 6, fue almacenada en un recipiente de plástico a temperatura ambiente.

3.2.3 Dosificación del coagulante natural

En pruebas preliminares se determinaron los rangos de dosis del coagulante natural para cada nivel de turbidez (20, 50, 100, 300 y 500 UNT), para lo cual, se ejecutó la prueba de jarras, aplicando 6 dosis representativas (10, 30, 50, 70, 90, 110 mg/L), realizando tres repeticiones por cada dosis aplicada. Finalizado el funcionamiento del equipo de jarras se midió la turbidez residual.

A partir de los resultados de turbidez residual se determinaron las seis dosis definitivas del coagulante natural por cada nivel de turbidez, estas dosis se aplicaron en las pruebas para

determinar la “dosis óptima” y “pH óptimo” del coagulante, ya que en la prueba para determinar la “concentración óptima” se aplica la dosis óptima del coagulante. Las dosis del coagulante natural se mencionan en la Tabla 4:

Tabla 4: Dosis del coagulante natural aplicadas por nivel de turbidez

Nivel de turbidez (UNT)	Dosis de coagulante natural (mg/L)					
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
20	20	25	30	35	40	45
50	35	40	45	50	55	60
100	40	45	50	55	60	65
300	60	65	70	75	80	85
500	70	75	80	85	90	95

FUENTE: Elaboración propia.

Para aplicar las dosis de los coagulantes se aplicó la “ecuación de balance de masas”, mediante la cual se determinó el volumen del coagulante para adicionar en cada jarra, dicho volumen se encuentra en función de la dosis del coagulante por aplicar, de la concentración de la solución del coagulante, y del volumen de la jarra; siendo el volumen de las jarras con las que se trabajaron de un litro de capacidad. A continuación se menciona la ecuación de balance de masas:

$$P = D \times Q = V \times CC$$

$$V_{(mL)} = \frac{D_{\left(\frac{mg}{L}\right)} \times Q_{(L)} \times 1\,000}{CC_{\left(\frac{mg}{L}\right)}}$$

- P** = Peso del coagulante
- V** = Volumen del coagulante que se aplicará en la jarra con la jeringa (mL)
- D** = Dosis del coagulante (mg/L)
- Q** = Capacidad de la jarra (L)
- CC** = Concentración de la solución del coagulante (mg/L)

El volumen del coagulante determinado mediante la ecuación de balance de masas, se agregó en un vaso precipitado utilizando pipetas, a fin de succionar todo el contenido con la ayuda de jeringas hipodérmicas con las agujas puestas. Una vez preparadas las 6 dosis del coagulante, se retiraron las agujas para poder aplicarlas durante el funcionamiento del equipo de la prueba de jarras.

3.2.4 Programación y funcionamiento del equipo de la prueba de jarras

Para el funcionamiento del equipo de la prueba de jarras se programó la velocidad y tiempo de la mezcla rápida y mezcla lenta, para lo cual, se tomó como referencia los valores utilizados por Parra *et al.* (2011) y Martínez *et al.* (2003); asimismo, se aplicó una agitación previa a fin de homogenizar las muestras. Las velocidades y tiempos programados en el equipo de la prueba de jarras de muestra en la Tabla 5:

Tabla 5: Programación del equipo de jarras

Etapa	Secuencia	Velocidad	Tiempo
Homogenización	1	50 RPM	10 segundos
Mezcla rápida	2	100 RPM	1 minuto
Mezcla lenta	3	30 RPM	20 minutos

FUENTE: Elaboración propia, referencia Parra *et al.* (2011) y Martínez *et al.* (2003)

Una vez programado el equipo de la prueba de jarras, con las 6 jarras de las muestras de agua colocadas en el equipo y las 6 dosis del coagulante preparadas, se puso en funcionamiento el equipo.

Puesto en marcha el equipo, inició con la homogenización de la muestra de agua, seguidamente, en el instante en que se produjo el inicio de la mezcla rápida se añadió en cada jarra la dosis respectiva del coagulante, de manera simultánea y en la zona de máxima turbulencia. Luego, continuó la etapa de mezcla lenta, la cual, una vez finalizada, el equipo se apaga automáticamente.

En la Figura 18 se observa el funcionamiento del equipo de la prueba de jarras después de haber añadido los coagulantes.



Figura 18. Equipo de la prueba de jarras en funcionamiento

Seguidamente, se procedió a retirar las jarras y se colocaron los tomadores de muestra (sifones), a fin de dejar sedimentar las muestras de agua durante 20 minutos. En la Figura 19 se observan las jarras con los tomadores de muestra colocados.



Figura 19: Jarras en reposo con tomadores de muestras

Transcurrido el tiempo de sedimentación, se descartaron los primeros 15 mL de muestra de cada jarra, retenidos en el sifón, a fin de enjuagar el tubo de muestreo; y se procedió a recolectar el sobrenadante de cada jarra, en un volumen aproximado de 30 mL,

De la muestra recolectada se midió la turbiedad residual, entre otros parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad y color).

3.2.5 Determinación de los parámetros óptimos del coagulante natural

Para determinar los parámetros óptimos *dosis*, *concentración* y *pH* del coagulante natural, por cada nivel de turbidez (20, 50, 100, 300 y 500 UNT), se desarrolló la metodología

propuesta por la CEPIS/OPS en el documento “Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración. Manual I: Teoría”, mediante la cual se ejecuta la prueba de jarras y se mide la turbiedad residual, a fin de determinar con qué parámetro se obtiene la mayor remoción de turbidez.

A. Determinación de la dosis óptima

Para determinar la dosis óptima del coagulante natural se ejecutó la prueba de jarras aplicando 6 dosis diferentes por cada nivel de turbidez (20, 50, 100, 300 y 500 UNT), las cuales se prepararon al 1%; asimismo, mediante la ecuación de balance de masas se determinó el volumen del coagulante para añadir en cada jarra.

Para la ejecución del equipo de la prueba de jarras se siguió el procedimiento descrito en el apartado 3.2.4. Programación y funcionamiento del equipo de la prueba de jarras. Es de señalar que se realizaron 3 repeticiones de la prueba de jarras por cada nivel de turbidez

Una vez finalizado el funcionamiento del equipo de la prueba de jarras y recolectados los sobrenadantes de las muestras de agua, se midió la turbiedad residual, a fin de determinar la dosis óptima con la cual se produjo una mayor remoción de la turbidez.

Asimismo, adicionalmente se midieron los parámetros fisicoquímicos color, conductividad y pH residual de las muestras recolectadas, valores que servirán para la evaluación de la variación de parámetros fisicoquímicos.

B. Determinación de la concentración óptima

Para determinar la concentración óptima del coagulante natural se ejecutó la prueba de jarras aplicando las dosis óptimas obtenidas en el procedimiento anterior por cada nivel de turbidez (20, 50, 100, 300 y 500 UNT); sin embargo, para ser aplicadas en las jarras, estas dosis se prepararon a partir de 6 concentraciones distintas: 0.1%, 0.5%, 1%, 2%, 5% y 10%; para ello, mediante la ecuación de balance de masas se determinó el volumen del coagulante que se adicionó en cada jarra.

De igual manera que en el procedimiento anterior, para la ejecución del equipo de la prueba de jarras se siguió el procedimiento descrito en el apartado 3.2.4. Programación y funcionamiento del equipo de la prueba de jarras. Asimismo, se realizaron 3 repeticiones de la prueba de jarras por cada nivel de turbidez.

Una vez finalizado el funcionamiento del equipo de la prueba de jarras y recolectados los sobrenadantes de las muestras de agua, se midió la turbiedad residual, a fin de determinar la concentración óptima con la cual se produjo una mayor remoción de turbidez.

Asimismo, adicionalmente se midieron los parámetros fisicoquímicos color, conductividad y pH residual de las muestras recolectadas, valores que servirán para la evaluación de la variación de parámetros fisicoquímicos.

C. Determinación del pH óptimo

Para determinar el pH óptimo del coagulante natural se ejecutó la prueba de jarras aplicando 6 dosis diferentes por cada nivel de turbidez (20, 50, 100, 300 y 500 UNT), las mismas que fueron aplicadas en el procedimiento para determinar la dosis óptima del coagulante, las cuales se prepararon a partir de la concentración óptima determinada en el procedimiento anterior; asimismo, mediante la ecuación de balance de masas se determinó el volumen del coagulante que se adicionó en cada jarra.

Sin embargo, en este caso, se probaron las muestras de agua cuyos niveles de pH fueron modificados hasta obtener valores de 5, 7 y 9, para ello, mediante una bureta volumétrica se añadió gota a gota en cada jarra los reactivos ácido sulfúrico o hidróxido de sodio, según se requería, mientras se verificaba el cambio del valor en el medidor de pH.

Una vez finalizado el funcionamiento del equipo de la prueba de jarras y recolectados los sobrenadantes de las muestras de agua, se midió la turbiedad residual, a fin de determinar el pH óptimo con el cual se produjo una mayor remoción de turbidez.

Asimismo, adicionalmente se midieron los parámetros fisicoquímicos color, conductividad y pH residual de las muestras recolectadas, valores que servirán para la evaluación de la variación de parámetros fisicoquímicos.

3.2.6 Evaluación de variación de parámetros fisicoquímicos

Para evaluar la variación de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua (turbiedad, color, conductividad y pH) al aplicar el coagulante natural, y comparar dichos resultados al aplicar el coagulante químico sulfato de aluminio, se procedió de la siguiente manera:

- Se preparó el coagulante químico para aplicarlo en la prueba de jarras, la solución del coagulante químico al 10% se preparó pesando 100 g de sulfato de aluminio y agregando esta cantidad en un matraz aforado de 1 litro de capacidad, el cual se enrazó con agua destilada; asimismo, se utilizó un agitador magnético para homogenizar la mezcla.

La solución de sulfato de aluminio al 10% de concentración fue almacenada en un recipiente de plástico a temperatura ambiente, a partir del cual se realizaron las diluciones necesarias para su uso en la prueba de jarras.

- Se determinaron los rangos de dosis del coagulante químico para cada nivel de turbidez (20, 50, 100, 300 y 500 UNT), para lo cual, se ejecutó el equipo de la prueba de jarras aplicando 6 dosis representativas (10, 30, 50, 70, 90 y 110 mg/L), tres repeticiones por cada dosis aplicada. Finalizado el funcionamiento del equipo de jarras se midió la turbidez residual de cada jarra.

A partir de los resultados de turbidez residual se determinaron las seis dosis definitivas del coagulante químico, las cuales, se presentan en la Tabla 6.

- Se desarrollaron los procedimientos para determinar la dosis óptima, concentración óptima y pH óptimo del coagulante químico, siguiendo los procedimientos descritos en el apartado 3.2.5. para determinar los parámetros óptimos del coagulante natural

Tabla 6: Dosis del coagulante químico aplicadas por cada nivel de turbidez

Nivel de turbidez (UNT)	Dosis de coagulante químico (mg/L)					
	Jarra 1	Jarra 2	Jarra 3	Jarra 4	Jarra 5	Jarra 6
20	10	15	20	25	30	35
50	20	25	30	35	40	45
100	35	40	45	50	55	60
300	45	50	55	60	65	70
500	70	75	80	85	90	95

FUENTE: Elaboración propia.

- Se evaluaron y compararon los valores finales de los parámetros fisicoquímicos turbiedad, conductividad, pH y color medidos en las pruebas de jarras. Para determinar dichos parámetros se siguió la metodología propuesta en el “Manual de Métodos Analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas” de Severiche *et al.* (2013), documento que se basa en los “Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas residuales”- 2005, 21th Edition, propuesta por la Asociación Americana de Salud Pública (APHA, por sus siglas en inglés), la Asociación Americana de Obras Hidráulicas (AWWA, por sus siglas en inglés), y la Federación del Medio Ambiente del Agua (WEF, por sus siglas en inglés).

En la Tabla 7 se indican los métodos empleados por cada parámetro medido:

Tabla 7: Parámetros fisicoquímicos medidos

Parámetro	Unidad de Medida	Método de Referencia (Standard Methods 21th Edition)
Turbiedad	UNT	Método 2120 B Visual Comparison Method
Color	UCV escala Pt/Co	Método 2130 B Nephelometric Method
pH	Valor de pH	Método 4500-H+ pH Value
Conductividad	μS/cm	Método 2510 Laboratory Method

Nota: UCV=Unidad de Color Verdadero; UNT=Unidad Nefelométrica de Turbidez.

FUENTE: Elaboración propia.

3.2.7 Análisis Estadístico

Considerando que se realizaron pruebas por triplicado por cada ensayo de la prueba de jarras, según el nivel de turbidez y tipo de coagulante empleado, se determinó el Coeficiente de Variabilidad (CV), el cual indica la dispersión de una serie de datos respecto al valor medio, para ello, a fin de validar la precisión de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos del agua (turbiedad, pH, color y conductividad) se consideró el rango de precisión señalado por Gordón y Camargo (2015), según se detalla en la Tabla 8.

Tabla 8: Rango de precisión de los experimentos

Aceptable	Buena/ Regular	Mala	Descartar
$0 < CV \leq 10$	$10 < CV \leq 20$	$20 < CV \leq 30$	$CV \geq 30$

FUENTE: Elaboración propia, referencia Gordón y Camargo (2015)

En el procedimiento para determinar la dosis óptima del coagulante, se realizó 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.

De igual manera, en el procedimiento para determinar la concentración óptima, se realizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) por cada tipo de coagulante y nivel de turbidez, el cual contempló seis tratamientos, correspondientes a las seis concentraciones del coagulante aplicado, con tres repeticiones por cada tratamiento, siendo la variable respuesta la turbidez residual.

En el caso de las pruebas para determinar el pH óptimo del coagulante, se aplicó un Diseño Completamente al Azar (DCA) de 2 factores: i) dosis del coagulante con seis tratamientos (correspondientes a las seis dosis del coagulante aplicado), y ii) pH de las muestras del agua con tres tratamientos (pH 5, pH 7 y pH 9); por cada tipo de coagulante y nivel de turbidez, con tres repeticiones para cada prueba, siendo la variable respuesta la turbidez residual.

Asimismo, para la validación estadística de los resultados de turbidez residual, en las pruebas de parámetros óptimos del coagulante natural, se utilizó el software SPSS para realizar el Análisis de Varianza (ANOVA) a un nivel de significancia de 0.05, a fin de determinar si los tratamientos (dosis aplicadas, concentraciones) o la interacción de estos, tienen un efecto o influencia en el parámetro turbiedad residual. Así también, se aplicó el estadístico Dunnet a un nivel de significancia de 0.05, con el propósito de comparar cada uno de los tratamientos contra el tratamiento mediante el cual se obtuvo la mayor remoción de turbidez.

Además, se estableció la correlación presente entre la dosis del coagulante natural y la turbiedad inicial de las muestras, a fin de obtener la ecuación de regresión que explique la dosis de coagulante natural necesaria para obtener la máxima remoción de turbidez, en función de la turbiedad inicial de la muestra a tratar. En atención a ello, se calculó el coeficiente de determinación (R^2), cuyo valor oscila entre 0 y 1, e indica el porcentaje de variabilidad de la dosis del coagulante que es explicado por la turbiedad inicial de las muestras; de igual manera, se determinó el coeficiente de correlación (r), el cual puede tomar valores entre -1 y 1, y mide la asociación existente entre las variables de la dosis óptima y nivel de turbidez de las muestras, siendo de señalar que si r es igual a cero significa que no existe correlación entre dichas variables.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la prueba de jarras con el coagulante natural hecho a base del cactus *Opuntia ficus-indica* se presentan en los 2 apartados siguientes: a) Determinación de los parámetros óptimos del coagulante natural, y b) Comparación de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua.

4.1 Determinación de los parámetros óptimos del coagulante natural

4.1.1 Resultados en muestras de 20 UNT

Se ejecutó la prueba de jarras para determinar la dosis óptima del coagulante natural en muestras de 20 UNT, en la Tabla 9 se presentan los valores de turbiedad residual promedio registrados al aplicar las seis dosis del coagulante natural.

Tabla 9: Dosis óptima en muestras de 20 UNT

Nivel de turbidez	N° Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
20	1	20	1	2.00	17.56
	2	25	1	2.50	12.30
	3	30	1	3.00	10.06
	4	35	1	3.50	11.56
	5	40	1	4.00	13.33
	6	45	1	4.50	14.04

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 1.5.

A partir de la Tabla 9, se elaboró la Figura 20 para representar la turbiedad residual versus las dosis del coagulante aplicado en muestras de agua de 20 UNT.

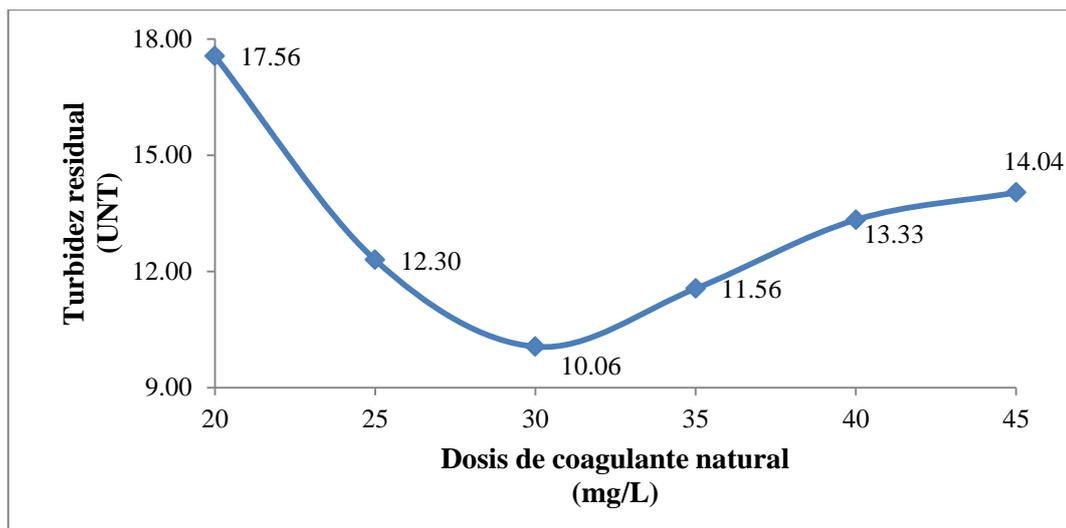


Figura 20: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 20 UNT

De la Figura 20 se aprecia que para una turbidez inicial de 20 UNT la dosis óptima del coagulante natural es 30 mg/L, con la cual se obtuvo 10.06 UNT de turbidez residual.

Con la dosis óptima determinada se ejecutó la prueba de jarras a fin de calcular la concentración óptima del coagulante natural en muestras de 20 UNT. En la Tabla 10 se muestran los valores de turbiedad residual promedio al aplicar la dosis óptima del coagulante natural, preparado a partir de seis concentraciones:

Tabla 10: Concentración óptima en muestras de 20 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	Nº Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
20	1	30	0.1	30.00	10.45
	2	30	0.5	6.00	10.54
	3	30	1	3.00	9.85
	4	30	2	1.50	9.14
	5	30	5	0.60	10.75
	6	30	10	0.30	11.30

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 2.5.

A partir de la Tabla 10, se elaboró la Figura 21 que representa la concentración óptima del coagulante natural.

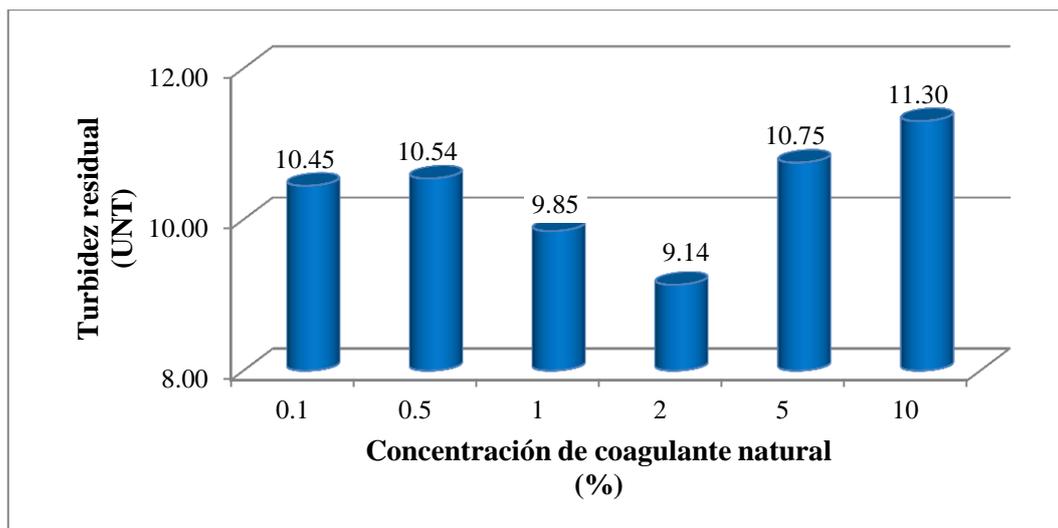


Figura 21: Concentración óptima del coagulante natural en muestras de 20 UNT

De la Figura 21 se aprecia que para una turbidez inicial de 20 UNT la concentración óptima del coagulante natural es 2%, con la cual se obtuvo 9.14 UNT de turbidez residual.

Con la concentración óptima determinada se procedió a ejecutar la prueba de jarras para determinar el pH óptimo del coagulante natural en muestras de 20 UNT. En la Tabla 11 se presentan los valores promedio de turbiedad residual según las dosis del coagulante aplicado en muestras con tres valores de pH inicial (5, 7 y 9)

Tabla 11: pH óptimo en muestras de 20 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)		
					pH 5	pH 7	pH 9
20	1	20	2	1.00	16.29	15.01	10.93
	2	25	2	1.25	15.79	14.47	9.31
	3	30	2	1.50	12.92	10.78	8.35
	4	35	2	1.75	13.64	11.35	9.41
	5	40	2	2.00	14.93	13.02	8.85
	6	45	2	2.25	14.27	14.5	10.02

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 3.5.

De la información de la Tabla 11 se elaboró la Figuras 22, en la cual se aprecia la variación de la turbiedad residual según las distintas dosis aplicadas en muestras de agua de 20 UNT con pH 5, 7 y 9.

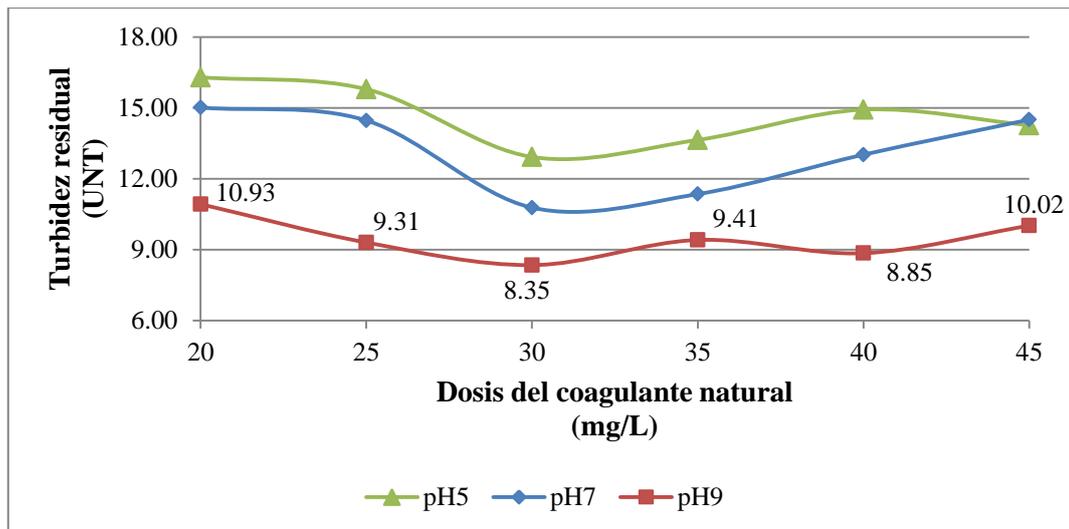


Figura 22: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 20 UNT

De la Figura 22 se aprecia que para una turbidez inicial de 20 UNT el pH óptimo del coagulante natural es 9, ya que en esas condiciones se obtuvo 8.35 UNT de turbidez residual, con una dosis del coagulante de 30 mg/L.

Los resultados indican que en muestras de 20 UNT se obtuvo el menor valor de turbidez residual de 8.35 UNT al aplicar una dosis de coagulante natural de 30 mg/L preparada a partir de una solución del coagulante al 2% y al ser aplicado en muestras de pH 9. Este valor equivale al 58.25% de remoción turbidez, con lo cual se demuestra que la efectividad del coagulante natural en la remoción de turbidez en muestras de 20 UNT es mayor al 55%.

Resultado similar presenta Quirós *et al.* (2010) al aplicar el coagulante natural cactus lefaria (*Subpilocereus repandus* (L.) Backeb) en muestras de agua de 20 UNT, ya que la remoción de turbidez no superó el 50% de eficiencia, asimismo, Fuentes *et al.* (2011) obtuvo el 14% de remoción de turbidez al aplicar el coagulante extraído del cactus *Stenocereus griseus*.

Con estos resultados se comprueba que los coagulantes naturales obtenidos de cactáceas no son tan eficientes en la remoción de turbidez en muestras de turbiedad baja; esto puede explicarse porque las partículas coloidales se encuentran más dispersas en las muestras y debido a la distancia entre ellas las fuerzas de atracción son menores, por lo cual, al aplicar el coagulante natural cuyas dosis son bajas no logran desestabilizar a la totalidad de

partículas coloidales; además, en esas condiciones las partículas se encuentran más propensas a re-estabilizarse, y los flóculos formados difícilmente no vuelven a formarse una vez rotos.

De otro lado, los valores promedio de la turbiedad residual de las muestras se procesaron para determinar el coeficiente de variabilidad (CV), el cual se encuentra en el intervalo de 0 a 10 ($0 < CV \leq 10$), resultados que se consideran aceptables y que reflejan una buena precisión en la ejecución de los experimentos; asimismo, se comprobó a un nivel de significancia de 0.05, que existen evidencias para afirmar que las varianzas de los tratamientos son homogéneas.

Considerando que los valores obtenidos resultaron aceptables y las varianzas homogéneas, se utilizó el software SPSS para procesar los promedios de turbidez residual con el estadístico ANOVA, a un nivel de significancia de 0.05, con lo cual, se comprobó que existen evidencias para afirmar que las seis dosis del coagulante natural aplicados son diferentes estadísticamente o al menos una de las dosis es diferente significativamente a las demás; asimismo, las seis concentraciones del coagulante natural preparadas son diferentes estadísticamente o al menos una de las concentraciones es diferente significativamente a las demás; así también, las seis dosis del coagulante natural, y los tres valores de pH inicial de las muestras de agua, así como, la interacción de estos (dosis del coagulante natural y pH muestra), son diferentes estadísticamente o al menos uno de ellos es diferente significativamente a los demás.

Por último, los promedios de turbidez residual fueron procesados con el estadístico Dunnett a un nivel de significancia de 0.05, obteniendo que con las dosis de 30 mg/L y 35 mg/L del coagulante natural se logran turbiedades residuales equivalentes estadísticamente; de igual manera, al tratar con las concentraciones del 1% y 2% se obtienen turbiedades residuales equivalentes estadísticamente. Con esto se demuestra que la equivalencia estadística en los resultados de la turbidez final se debe a la proximidad de las dosis aplicadas y concentraciones preparadas; sin embargo, con los parámetros óptimos se obtiene un mayor porcentaje de remoción de turbidez.

4.1.2 Resultados en muestras de 50 UNT

Se ejecutó la prueba de jarras para determinar la dosis óptima del coagulante natural en muestras de 50 UNT, en la Tabla 12 se presentan los valores de turbiedad residual promedio registrados al aplicar las seis dosis del coagulante natural.

Tabla 12: Dosis óptima en muestras de 50 UNT

Nivel de turbidez	N° Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
50	1	35	1	3.50	30.32
	2	40	1	4.00	27.09
	3	45	1	4.50	23.98
	4	50	1	5.00	25.61
	5	55	1	5.50	28.06
	6	60	1	6.00	30.95

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 1.4.

A partir de la Tabla 12, se elaboró la Figura 23 para representar la turbiedad residual versus las dosis del coagulante aplicado en muestras de agua de 50 UNT.

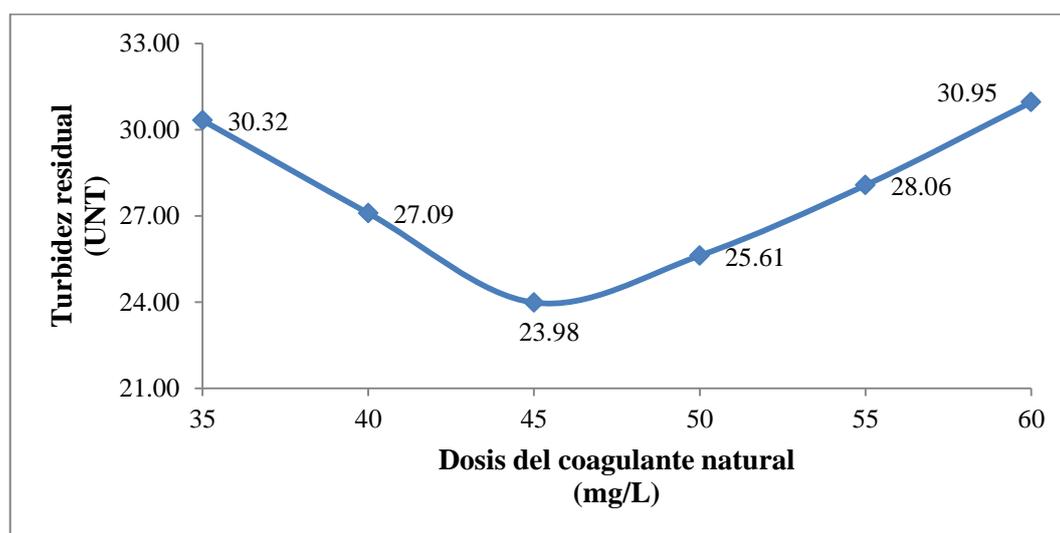


Figura 23: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 50 UNT

De la Figura 23 se aprecia que para una turbidez inicial de 50 UNT la dosis óptima del coagulante natural es 45 mg/L, con la cual se obtuvo 23.98 UNT de turbiedad residual.

Con la dosis óptima determinada se ejecutó la prueba de jarras a fin de calcular la concentración óptima del coagulante natural en muestras de 50 UNT. En la Tabla 13 se muestran los valores de turbiedad residual promedio al aplicar la dosis óptima del coagulante natural, preparado a partir de seis concentraciones:

Tabla 13: Concentración óptima en muestras de 50 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
50	1	45	0.1	45.00	23.87
	2	45	0.5	9.00	23.21
	3	45	1	4.50	23.01
	4	45	2	2.25	22.42
	5	45	5	0.90	22.88
	6	45	10	0.45	27.33

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 2.4.

A partir de la Tabla 13, se elaboró la Figura 24 que representa la concentración óptima del coagulante natural.

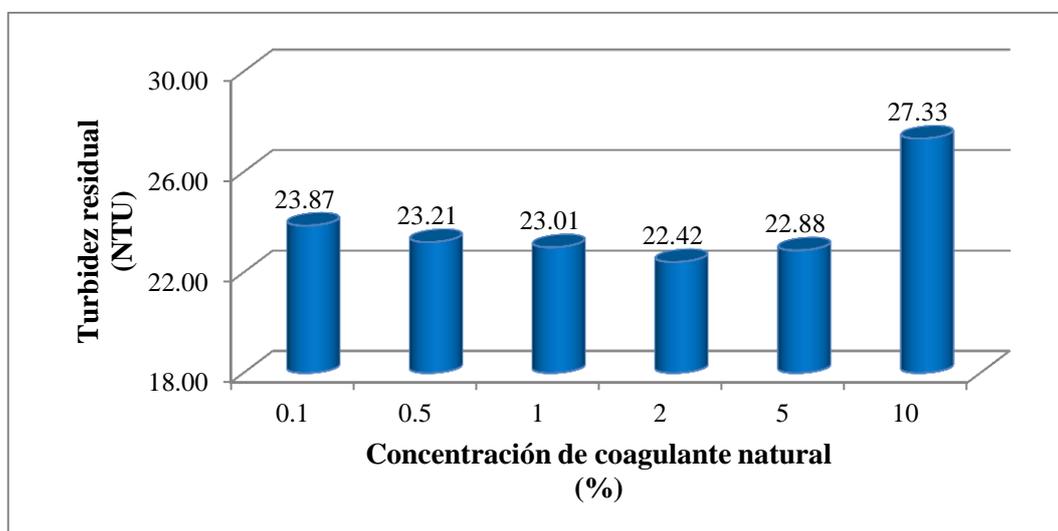


Figura 24: Concentración óptima del coagulante natural en muestras de 50 UNT

De la Figura 24 se aprecia que para una turbiedad inicial de 50 UNT la concentración óptima del coagulante natural es 2%, con la cual se obtuvo 22.42 UNT de turbiedad residual.

Con la concentración óptima determinada se procedió a ejecutar la prueba de jarras para determinar el pH óptimo del coagulante natural en muestras de 50 UNT. En la Tabla 14 se presentan los valores promedio de turbiedad residual según las dosis del coagulante aplicado en muestras con tres valores de pH inicial (5, 7 y 9).

Tabla 14: pH óptimo en muestras de 50 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)		
					pH 5	pH 7	pH 9
50	1	35	2	1.75	32.64	31.29	25.39
	2	40	2	2.00	29.60	26.94	24.37
	3	45	2	2.25	31.71	25.55	20.36
	4	50	2	2.50	32.61	28.76	22.66
	5	55	2	2.75	33.11	30.48	24.61
	6	60	2	3.00	34.19	33.69	25.72

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 3.4.

A partir de la Tabla 14 se elaboró la Figura 25, en la cual se aprecia la variación de la turbiedad residual según las distintas dosis aplicadas en muestras de agua de 50 UNT con pH 5, 7 y 9.

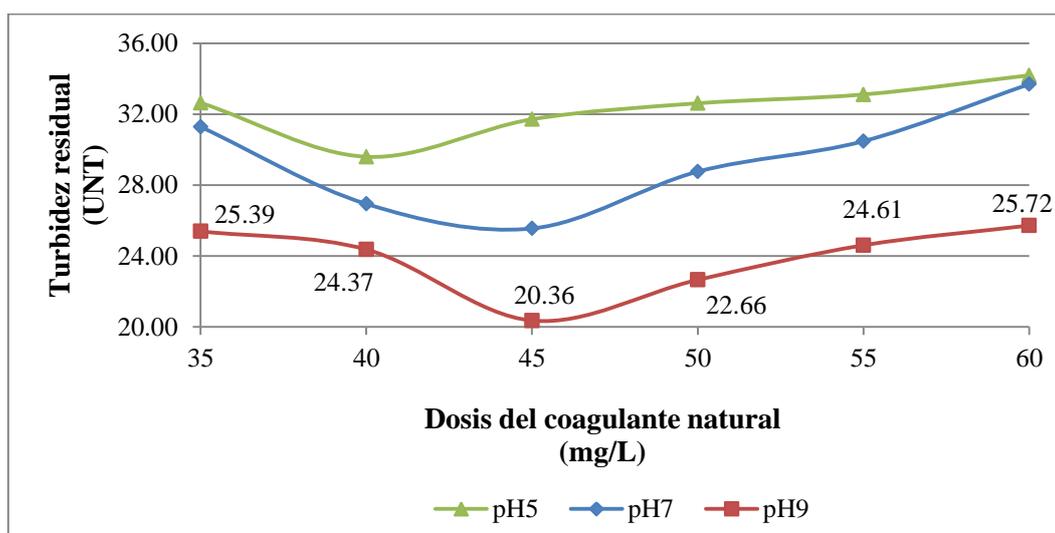


Figura 25: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 50 UNT

De la Figura 25 se aprecia que para una turbidez inicial de 50 UNT el pH óptimo del coagulante natural es 9, ya que en esas condiciones se obtuvo 20.36 UNT de turbidez residual, con una dosis del coagulante de 45 mg/L.

Los resultados indican que se obtuvo el menor valor de turbidez residual de 20.36 UNT al aplicar una dosis de coagulante natural de 45 mg/L preparada a partir de una solución del coagulante al 2% y al ser aplicado en muestras de pH 9. Este valor equivale al 59.27% de remoción turbidez, con lo cual se demuestra que la efectividad del coagulante natural en la remoción de turbidez en muestras de 50 UNT es cercano al 60%.

Cabe resaltar que según Fuentes *et al.* (2011), quién preparó muestras de 50 UNT diluyendo agua cruda recolectada de una planta de tratamiento, obtuvo un porcentaje de remoción de 80.42% al aplicar en muestras de 50 UNT una solución del mucílago de 50% m/v extraído del cactus *Stenocereus griseus*; valor superior al registrado en el presente informe; sin embargo, se debe señalar que la referida investigadora aplicó el coagulante en forma de una mezcla mucilaginoso y la dosis aplicada (400 ppm) fue muy superior a la aplicada en este trabajo (45 mg/L), lo que explicaría la diferencia en los resultados, ya que al sobresaturar las muestras con el coagulante se produce un efecto de barrido en las partículas coloidales (Richter 1984 y Andía 2000)

Así también, Almendárez (2004) comparó la influencia de la concentración de los coagulantes en muestras de 50 UNT con pH corregido (7 y 9.09), para ello, preparó el polímero natural *Opuntia Cochinellífera*, al 1% y 2% para aplicarlos en el tratamiento de agua cruda, con lo cual, concluyó que la concentración del 2% es favorable en la eliminación de turbidez al tratar agua cruda con el coagulante natural, sin embargo, se redujo su eficacia a la concentración del 1%, valor similar registrado en esta investigación; asimismo, señaló que el referido cactus presentó mayor eficiencia en la remoción de turbidez en muestras con pH 7, sin embargo, esta diferencia corresponde a 0.83 UNT, por lo cual, no se considera significativa. Al respecto, se debe señalar que en la presente investigación también se obtuvieron buenos resultados en muestras de pH 7 con 25.55 UNT de turbidez residual, sin embargo, la acción del coagulante fue superior en muestras de pH 9 con 20.36 de turbidez final.

De otro lado, los valores promedio de la turbiedad residual se procesaron para determinar el coeficiente de variabilidad (CV), determinando que se encuentran en el intervalo de 0 a 10 ($0 < CV \leq 10$), resultados que se consideran aceptables y que reflejan una buena precisión en la ejecución de los experimentos; asimismo, se comprobó a un nivel de significancia de 0.05, que existen evidencias para afirmar que las varianzas de los tratamientos son homogéneas.

Considerando que los valores obtenidos resultaron aceptables y las varianzas homogéneas, se utilizó el software SPSS para procesar los promedios de turbidez residual con el estadístico ANOVA, a un nivel de significancia de 0.05, con lo cual, se comprobó que existen evidencias para afirmar que las seis dosis del coagulante natural aplicados son diferentes estadísticamente o al menos una de las dosis es diferente significativamente a las demás; asimismo, las seis concentraciones del coagulante natural preparadas son diferentes estadísticamente o al menos una de las concentraciones es diferente significativamente a las demás; además, las seis dosis del coagulante natural, y los tres valores de pH inicial de las muestras de agua, así como, la interacción de estos (dosis del coagulante natural y pH muestra), son diferentes estadísticamente o al menos uno de ellos es diferente significativamente a los demás.

Por último, los promedios de turbidez residual fueron procesados con el estadístico Dunnett a un nivel de significancia de 0.05, resultando que con las dosis de 50 mg/L y 45 mg/L del coagulante natural se obtienen turbiedades residuales equivalentes estadísticamente; de otro lado, se obtiene que la concentración óptima del coagulante natural es diferente significativamente a las demás concentraciones. Con esto se demuestra que la equivalencia estadística en los resultados de la turbidez final se debe a la proximidad de las dosis aplicadas; sin embargo, se debe señalar que con los parámetros óptimos se obtiene un mayor porcentaje de remoción de turbidez.

4.1.3 Resultados en muestras de 100 UNT

Se ejecutó la prueba de jarras para determinar la dosis óptima del coagulante natural en muestras de 100 UNT, en la Tabla 15 se presentan los valores de turbiedad residual promedio registrados al aplicar las seis dosis del coagulante natural.

Tabla 15: Dosis óptima en muestras de 100 UNT

Nivel de turbidez	N° Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
100	1	40	1	4.00	38.95
	2	45	1	4.50	36.22
	3	50	1	5.00	32.45
	4	55	1	5.50	28.88
	5	60	1	6.00	35.57
	6	65	1	6.50	38.43

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 1.3.

A partir de la Tabla 15, se elaboró la Figura 26 que detalla los valores de turbiedad residual en muestras de agua de 100 UNT.

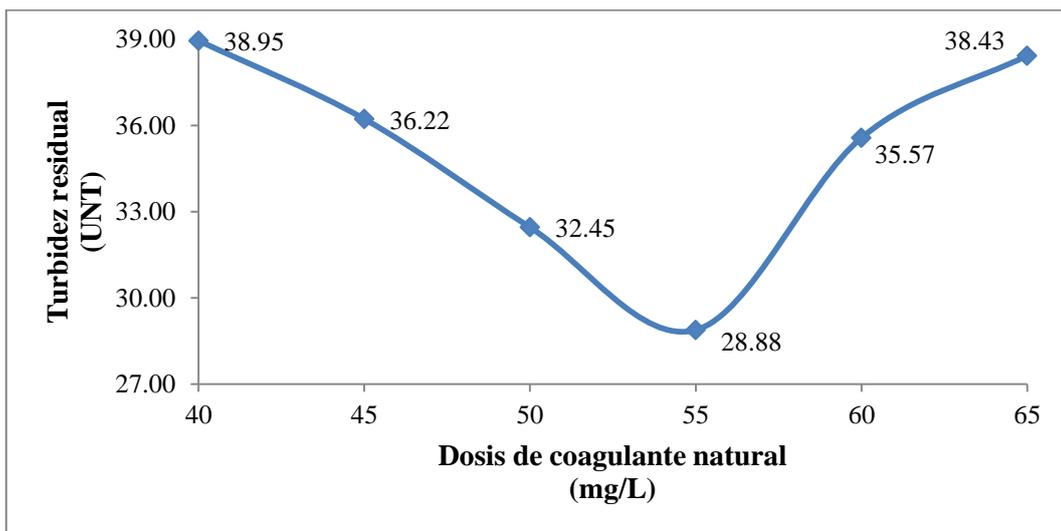


Figura 26: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 100 UNT

De la Figura 26 se aprecia que para una turbiedad inicial de 100 UNT la dosis óptima del coagulante natural es 55 mg/L, con la cual se obtuvo 28.88 UNT de turbiedad residual.

Con la dosis óptima determinada se ejecutó la prueba de jarras a fin de calcular la concentración óptima del coagulante natural en muestras de 100 UNT. En la Tabla 16 se muestran los valores de turbiedad residual promedio al aplicar la dosis óptima del coagulante natural, preparado a partir de seis concentraciones:

Tabla 16: Concentración óptima en muestras de 100 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
100	1	55	0.1	55.00	34.76
	2	55	0.5	11.00	28.43
	3	55	1	5.50	27.87
	4	55	2	2.75	31.45
	5	55	5	1.10	32.38
	6	55	10	0.55	34.03

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 2.3.

A partir de la Tabla 16, se elaboró la Figura 27 para representar la concentración óptima del coagulante natural.

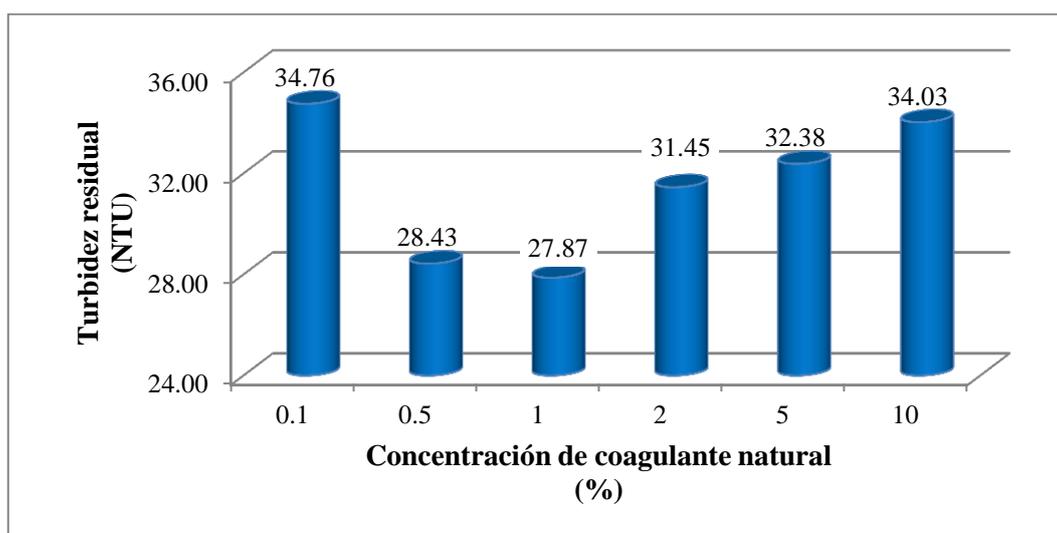


Figura 27: Concentración óptima en muestras de 100 UNT

De la Figura 27 se aprecia que para una turbidez inicial de 100 UNT la concentración óptima del coagulante natural es 1%, con la cual se obtuvo 27.87 UNT de turbiedad residual.

Con la concentración óptima determinada se procedió a ejecutar la prueba de jarras para determinar el pH óptimo del coagulante natural en muestras de 100 UNT. En la Tabla 17 se presentan los valores promedio de turbiedad residual según las dosis del coagulante aplicado en muestras con tres valores de pH inicial (5, 7 y 9).

Tabla 17: pH óptimo en muestras de 100 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)		
					pH 5	pH 7	pH 9
100	1	40	1	4.00	41.42	34.98	31.69
	2	45	1	4.50	39.60	34.57	30.00
	3	50	1	5.00	36.60	33.78	27.87
	4	55	1	5.50	40.01	32.54	29.25
	5	60	1	6.00	41.53	31.39	30.44
	6	65	1	6.50	41.53	34.50	31.81

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 3.3.

Con los datos de la Tabla 17 se elaboró la Figura 28, en la cual se aprecia la variación de la turbiedad residual según las distintas dosis aplicadas en muestras de agua de 100 UNT con pH 5, 7 y 9.

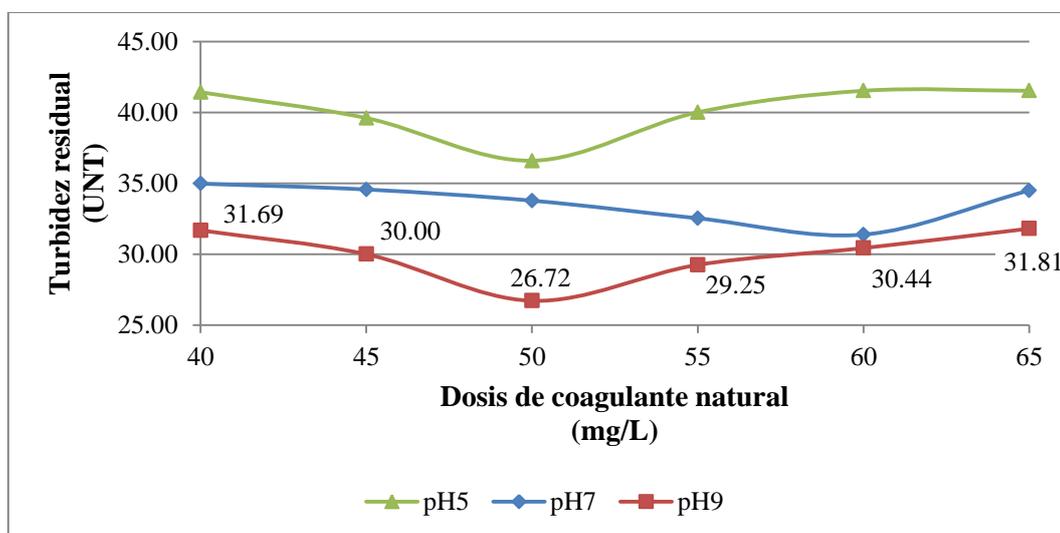


Figura 28: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 100 UNT

De la Figura 28 se aprecia que para una turbidez inicial de 100 UNT el pH óptimo del coagulante natural es 9, ya que en esas condiciones se obtuvo 26.72 UNT de turbiedad residual, con una dosis del coagulante de 50 mg/L.

Los resultados indican que se obtuvo el menor valor de turbiedad residual de 26.72 UNT al aplicar una dosis de coagulante natural de 50 mg/L preparada a partir de una solución del

coagulante al 1% y al ser aplicado en muestras de pH 9. Este valor equivale al 73.28% de remoción turbidez, con lo cual se demuestra que la efectividad del coagulante natural en la remoción de turbidez en muestras de 100 UNT es superior al 70%.

De manera similar, Fuentes *et al.* (2011) preparó muestras de 100 UNT diluyendo agua cruda recolectada de una planta de tratamiento, obteniendo un porcentaje de remoción de 64.80% al aplicar la solución del mucílago extraído del cactus *Stenocereus griseus*, resultado comparable al obtenido en la presente investigación, sin embargo, el cactus *Opuntia ficus-indica* demuestra ser ligeramente más eficiente en la remoción de turbidez para muestras de 100 UNT.

De otro lado, los valores promedio de turbiedad residual se procesaron para determinar el coeficiente de variabilidad (CV), determinando que se encuentran en el intervalo de 0 a 10 ($0 < CV \leq 10$), resultados que se consideran aceptables y que reflejan una buena precisión en la ejecución de los experimentos; asimismo, se comprobó a un nivel de significancia de 0.05, que existen evidencias para afirmar que las varianzas de los tratamientos son homogéneas.

Considerando que los valores obtenidos resultaron aceptables y las varianzas homogéneas, se utilizó el software SPSS para procesar los promedios de turbidez residual con el estadístico ANOVA, a un nivel de significancia de 0.05, con lo cual, se comprobó que existen evidencias para afirmar que las seis dosis del coagulante natural aplicados son diferentes estadísticamente o al menos una de las dosis es diferente significativamente a las demás; asimismo, las seis concentraciones del coagulante natural preparadas son diferentes estadísticamente o al menos una de las concentraciones es diferente significativamente a las demás; además, las seis dosis del coagulante natural, y los tres valores de pH inicial de las muestras de agua, así como, la interacción de estos (dosis del coagulante natural y pH muestra), son diferentes estadísticamente o al menos uno de ellos es diferente significativamente a los demás.

Por último, los promedios de turbidez residual fueron procesados con el estadístico Dunnett a un nivel de significancia de 0.05, resultando que la dosis óptima del coagulante natural es diferente significativamente a las demás dosis aplicadas; de igual manera, la concentración óptima del coagulante natural es diferente significativamente a las demás concentraciones.

4.1.4 Resultados en muestras de 300 UNT

Se ejecutó la prueba de jarras para determinar la dosis óptima del coagulante natural en muestras de 300 UNT, en la Tabla 18 se presentan los valores de turbiedad residual promedio registrados al aplicar las seis dosis del coagulante natural.

Tabla 18: Dosis óptima en muestras de 300 UNT

Nivel de turbidez	N° Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
300	1	60	1	6.00	89.51
	2	65	1	6.50	76.61
	3	70	1	7.00	75.45
	4	75	1	7.50	67.26
	5	80	1	8.00	75.43
	6	85	1	8.50	80.86

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 1.2.

A partir de la Tabla 18, se elaboró la Figura 29 en la cual se aprecia la variación de la turbiedad residual en muestras de agua de 300 UNT, al aplicar las dosis del coagulante natural.

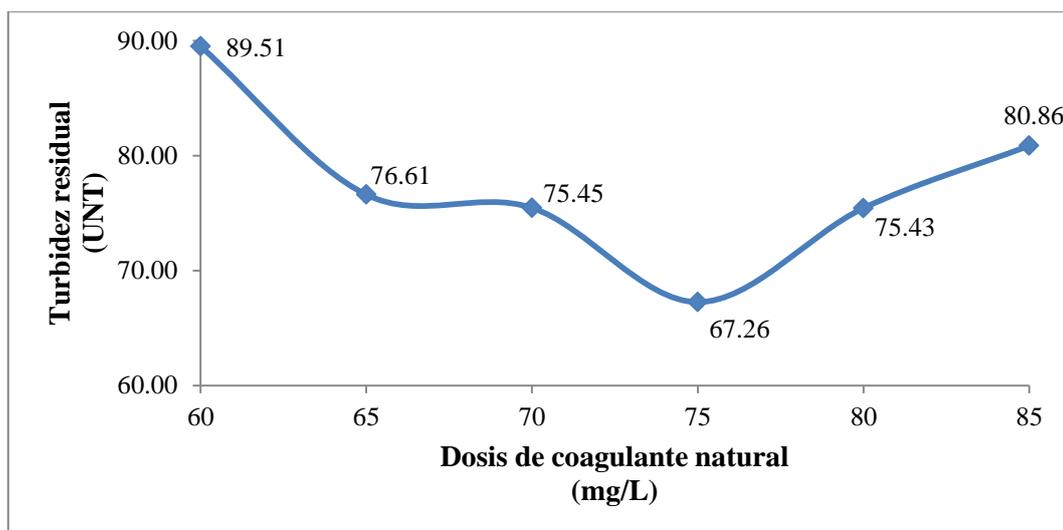


Figura 29: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 300 UNT

De la Figura 29 se aprecia que para una turbidez inicial de 300 UNT la dosis óptima del coagulante natural es 75 mg/L, con la cual se obtuvo 67.26 UNT de turbidez residual.

Con la dosis óptima determinada se ejecutó la prueba de jarras a fin de calcular la concentración óptima del coagulante natural en muestras de 300 UNT. En la Tabla 19 se muestran los valores de turbiedad residual promedio al aplicar la dosis óptima del coagulante natural, preparado a partir de seis concentraciones:

Tabla 19: Concentración óptima en muestras de 300 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	Nº Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
300	1	75	0.1	75.00	76.92
	2	75	0.5	15.00	68.40
	3	75	1	7.50	64.66
	4	75	2	3.75	65.27
	5	75	5	1.50	68.89
	6	75	10	0.75	73.64

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 2.2.

A partir de la Tabla 19, se elaboró la Figura 30 que describe la variación de la turbiedad residual con diferentes concentraciones del coagulante:

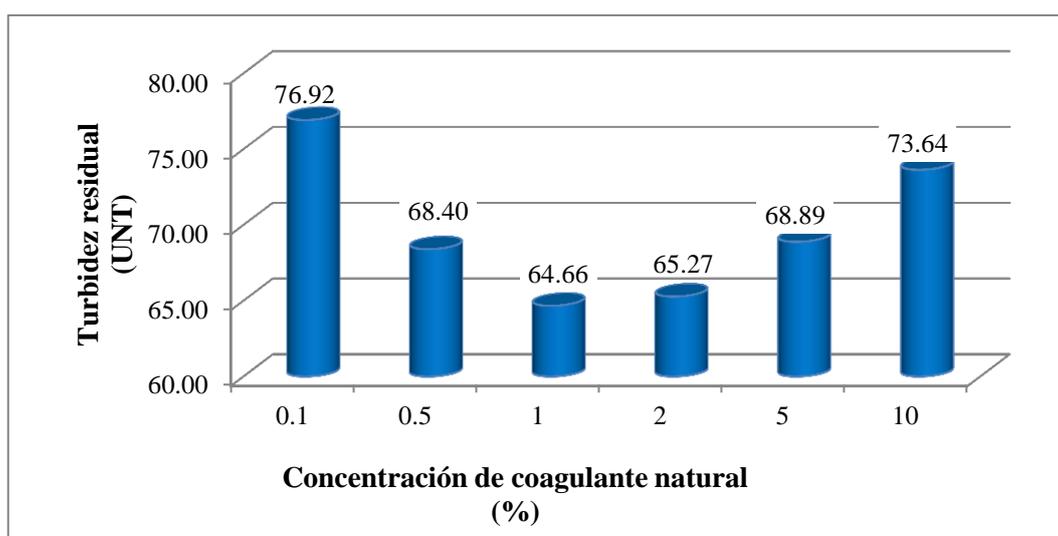


Figura 30: Concentración óptima del coagulante natural en muestras de 300 UNT

De la Figura 30 se aprecia que en muestras de 300 UNT la concentración óptima del coagulante natural es 1%, con la cual se obtuvo 64.66 UNT de turbidez residual.

Con la concentración óptima determinada se procedió a ejecutar la prueba de jarras para determinar el pH óptimo del coagulante natural en muestras de 300 UNT. En la Tabla 20 se presentan los valores promedio de turbiedad residual según las dosis del coagulante aplicado en muestras con tres valores de pH inicial (5, 7 y 9).

Tabla 20: pH óptimo en muestras de 300 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)		
					pH 5	pH 7	pH 9
300	1	60	1	6.00	85.55	79.24	71.84
	2	65	1	6.50	83.47	74.98	67.91
	3	70	1	7.00	82.15	75.94	64.29
	4	75	1	7.50	80.14	70.75	65.55
	5	80	1	8.00	80.98	72.64	70.53
	6	85	1	8.50	83.24	76.00	71.60

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 3.2.

De la información de la Tabla 20 se elaboró la Figura 31, en la cual se aprecia la variación de la turbiedad residual según las distintas dosis del coagulante aplicado en muestras de agua de 300 UNT con pH 5, 7 y 9.

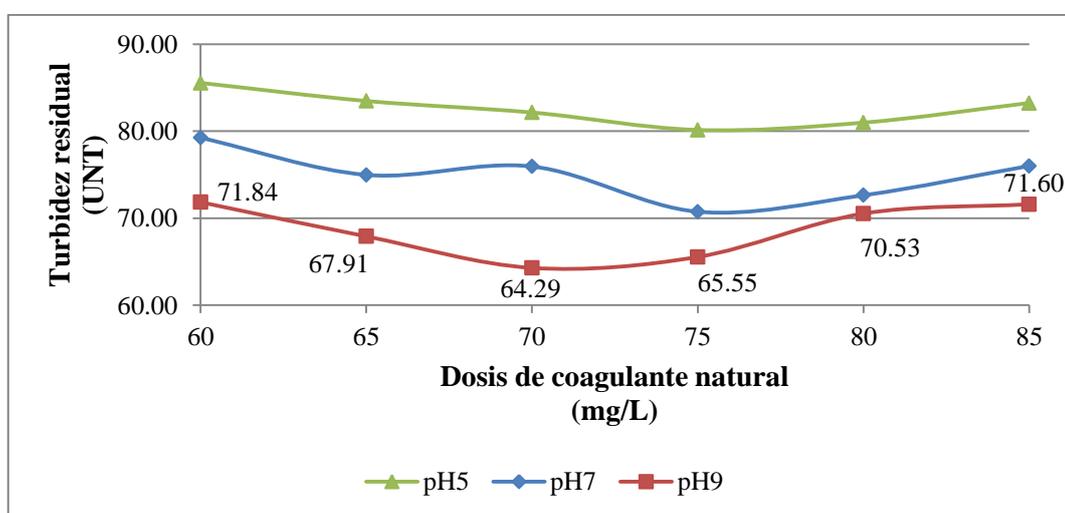


Figura 31: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 300 UNT

De la Figura 31 se aprecia que para una turbidez inicial de 300 UNT el pH óptimo del coagulante natural es 9, ya que en esas condiciones se obtuvo 64.29 UNT de turbidez residual, con una dosis del coagulante de 70 mg/L.

Los resultados indican que se obtuvo el menor valor de turbidez residual de 64.29 UNT al aplicar una dosis de coagulante natural de 70 mg/L preparada a partir de una solución del coagulante al 1% y al ser aplicado en muestras de pH 9. Este valor equivale al 78.57% de remoción turbidez, con lo cual se demuestra que la efectividad del coagulante natural en la remoción de turbidez en muestras de 300 UNT estuvo por encima del 75%.

Al respecto, Feria *et al.* (2016) trabajó con muestras de agua de río, con turbiedades entre 56 y 301 UNT, a las cuales aplicó extracto del coagulante natural (cactus *Hylocereus cf. trigonus*) disuelto en solución salina, obteniendo una eficiencia entre 50% y 70% en la eliminación de turbiedad; con lo cual se comprueba que a un nivel de turbidez de 300 UNT, el cactus *Opuntia ficus-indica* fue más eficiente en la remoción de turbidez que la otra especie de cactus; esto puede explicarse porque el referido investigador empleó un método de preparación del coagulante distinto al de la presente investigación, al utilizar una solución salina, la cual habría repercutido en la acción del coagulante natural para la desestabilización de las partículas coloidales, al no formarse los compuestos poliméricos que se adhieren a los coloides.

De otro lado, los valores promedio de la turbiedad residual se procesaron para determinar el coeficiente de variabilidad (CV), determinando que se encuentran en el intervalo de 0 a 10 ($0 < CV \leq 10$), resultados que se consideran aceptables y que reflejan una buena precisión en la ejecución de los experimentos; asimismo, se comprobó a un nivel de significancia de 0.05, que existen evidencias para afirmar que las varianzas de los tratamientos son homogéneas.

Considerando que los valores obtenidos resultaron aceptables y las varianzas homogéneas, se utilizó el software SPSS para procesar los promedios de turbidez residual con el estadístico ANOVA, a un nivel de significancia de 0.05, con lo cual, se comprobó que existen evidencias para afirmar que las seis dosis del coagulante natural aplicados son diferentes estadísticamente o al menos una de las dosis es diferente significativamente a las demás; asimismo, las seis concentraciones del coagulante natural preparadas son diferentes

estadísticamente o al menos una de las concentraciones es diferente significativamente a las demás; así también, las seis dosis del coagulante natural, y los tres valores de pH inicial de las muestras de agua, así como, la interacción de estos (dosis del coagulante natural y pH muestra), son diferentes estadísticamente o al menos uno de ellos es diferente significativamente a los demás.

Por último, los promedios de turbidez residual fueron procesados con el estadístico Dunnet a un nivel de significancia de 0.05, resultando que la dosis óptima del coagulante natural es diferente significativamente a las demás dosis aplicadas; de otro lado, al tratar con las concentraciones del 1% y 2% se obtuvo turbiedades residuales equivalentes estadísticamente. Con esto se demuestra que la equivalencia estadística en los resultados de la turbidez final se debe a la proximidad de las concentraciones preparadas; sin embargo, se debe señalar que con la concentración óptima se obtiene un mayor porcentaje de remoción de turbidez.

4.1.5 Resultados en muestras de 500 UNT

Se ejecutó la prueba de jarras para determinar la dosis óptima del coagulante natural en muestras de 500 UNT, en la Tabla 21 se presentan los valores de turbiedad residual promedio registrados al aplicar las seis dosis del coagulante natural.

Tabla 21: Dosis óptima en muestras de 500 UNT

Nivel de turbidez	N° Jarra	Dosis de coagulante (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
500	1	70	1	7.00	91.72
	2	75	1	7.50	87.46
	3	80	1	8.00	83.38
	4	85	1	8.50	81.10
	5	90	1	9.00	74.85
	6	95	1	9.50	82.42

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 1.1.

A partir de la Tabla 21, se elaboró la Figura 32, en la cual se representa la variación de la turbiedad residual al aplicar distintas dosis del coagulante natural.

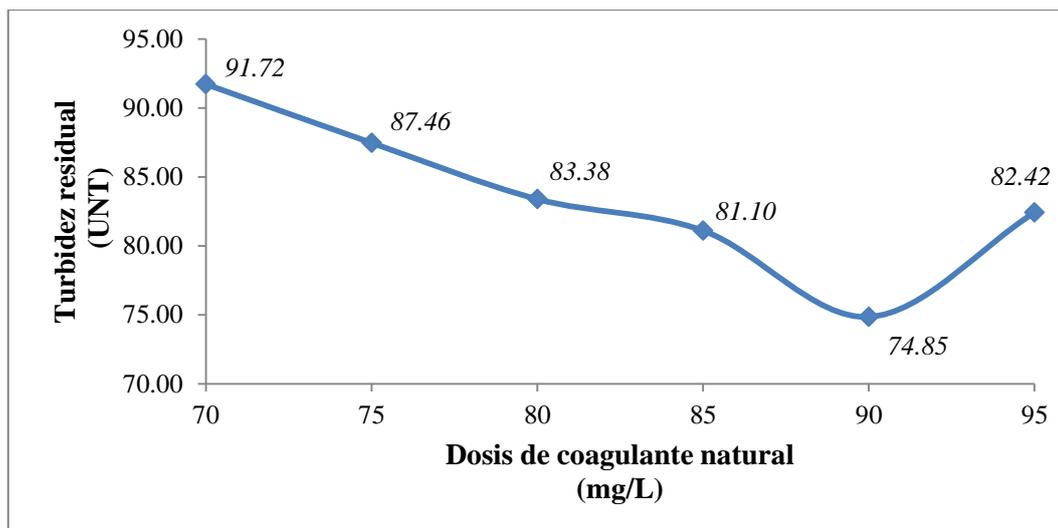


Figura 32: Dosis óptima del coagulante natural en muestras de 500 UNT

De la Figura 32 se aprecia que para una turbidez inicial de 500 UNT la dosis óptima del coagulante natural es 90 mg/L, con la cual se obtuvo 74.85 UNT de turbidez residual.

Con la dosis óptima determinada se ejecutó la prueba de jarras a fin de calcular la concentración óptima del coagulante natural en muestras de 500 UNT. En la Tabla 22 se muestran los valores de turbiedad residual promedio al aplicar la dosis óptima del coagulante natural, preparado a partir de seis concentraciones:

Tabla 22: Concentración óptima en muestras de 500 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. de coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)
300	1	90	0.1	90.00	76.67
	2	90	0.5	18.00	71.53
	3	90	1	9.00	75.06
	4	90	2	4.50	77.03
	5	90	5	1.80	78.27
	6	90	10	0.90	85.09

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 2.1.

A partir de la Tabla 22, se elaboró la Figura 33, la cual presenta la variación de la turbiedad residual en muestras de agua de 500 UNT al aplicar las dosis óptimas del coagulante natural, preparado a partir de diferentes concentraciones:

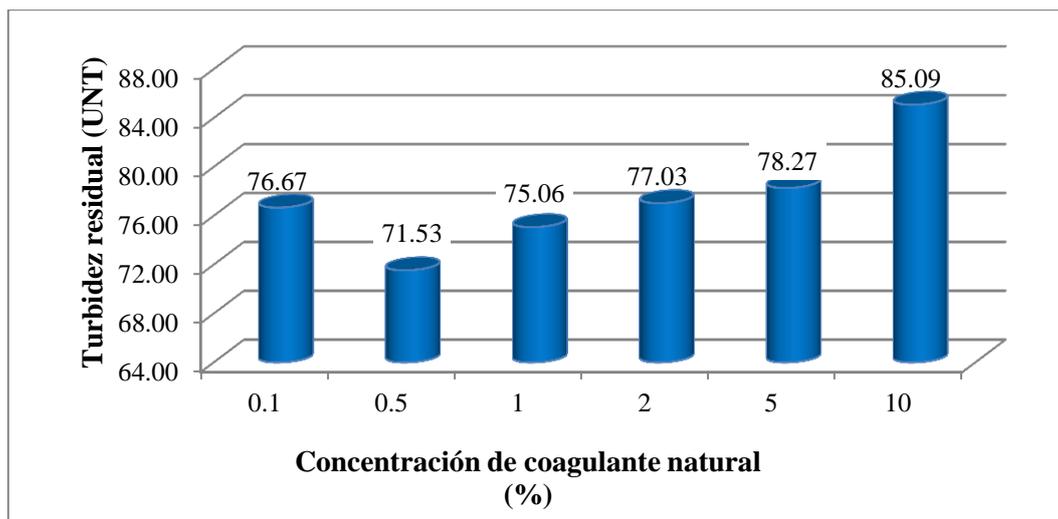


Figura 33: Concentración óptima del coagulante natural en muestras de 500 UNT

De la Figura 33 se aprecia que para una turbidez inicial de 500 UNT la concentración óptima del coagulante natural es 0.5%, con la cual se obtuvo 71.53 UNT de turbidez residual; esto puede explicarse porque con concentraciones pequeñas como 0.5% el volumen de coagulante añadido es mayor, lo que favorece su dispersión en el medio facilitando la mezcla del mismo en las muestras de agua, y con ello el proceso de coagulación. (Vargas *et al.* 2004).

Con la concentración óptima determinada se procedió a ejecutar la prueba de jarras para determinar el pH óptimo del coagulante natural en muestras de 500 UNT. En la Tabla 23 se presentan los valores promedio de turbiedad residual según las dosis del coagulante aplicado en muestras con tres valores de pH inicial (5, 7 y 9).

Tabla 23: pH óptimo en muestras de 500 UNT

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima (mg/L)	CC. coagulante (%)	Volumen jeringa (mL)	Turbiedad residual promedio (UNT)		
					pH 5	pH 7	pH 9
500	1	70	0.5	14.00	98.13	99.24	80.76
	2	75	0.5	15.00	94.78	90.64	75.03
	3	80	0.5	16.00	96.36	85.94	70.63
	4	85	0.5	17.00	90.40	80.75	77.16
	5	90	0.5	18.00	89.61	87.64	75.74
	6	95	0.5	19.00	91.56	88.00	77.76

FUENTE: Elaboración propia, referencia Anexo 3.1.

De la información de la Tabla 23 se elaboró la Figura 34, en la cual se representa la variación de la turbiedad residual según las distintas dosis aplicadas en muestras de agua de 500 UNT con pH 5, 7 y 9.

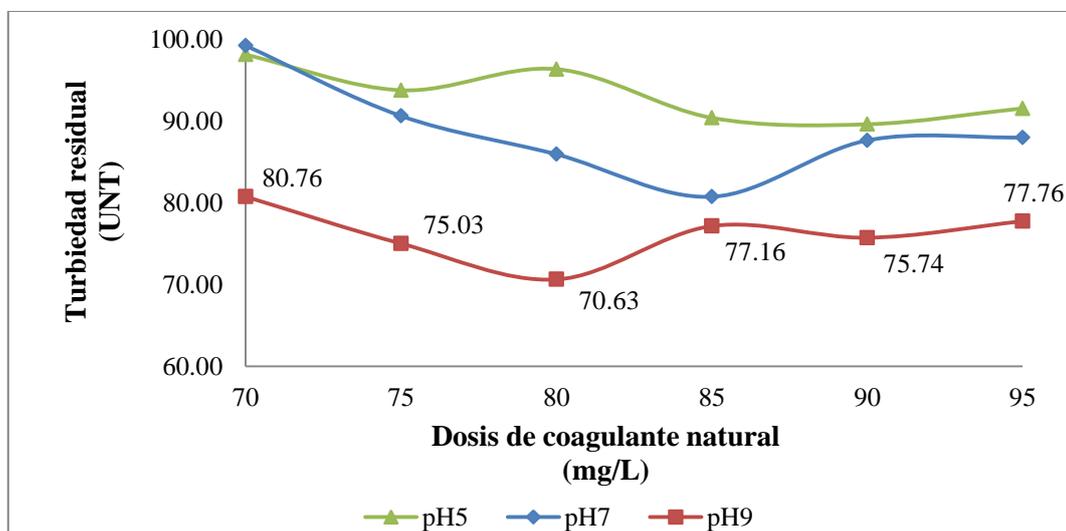


Figura 34: pH óptimo del coagulante natural en muestras de 500 UNT

De la Figura 34 se aprecia que para una turbidez inicial de 500 UNT el pH óptimo del coagulante natural es 9, ya que en esas condiciones se obtuvo 70.63 UNT de turbidez residual, con una dosis del coagulante de 80 mg/L.

Los resultados indican que en muestras de 500 UNT se obtuvo el menor valor de turbidez residual de 70.63 UNT al aplicar una dosis de coagulante natural de 80 mg/L preparada a partir de una solución del coagulante al 0.5% y al ser aplicado en muestras de pH 9. Este valor equivale al 85.87% de remoción turbidez, con lo cual se demuestra que la efectividad del coagulante natural en la remoción de turbidez en muestras de 300 UNT fue superior al 80%.

Al respecto, Yang *et al.* (2010) obtuvo resultados similares al aplicar como coagulante en polvo de cactus *Opuntia* en muestras de agua de río de 547 UNT y agua de estuario de 499 UNT, consiguiendo la eliminación de turbidez de hasta el 70% y 98%, respectivamente, concluyendo que el cactus *Opuntia* tiene el potencial de ser utilizado para aplicaciones de tratamiento de aguas superficiales.

De otro lado, los valores promedio de la turbiedad residual de las muestras se procesaron para determinar el coeficiente de variabilidad (CV), determinando que se encuentran en el intervalo de 0 a 10 ($0 < CV \leq 10$), resultados que se consideran aceptables y que reflejan una buena precisión en la ejecución de los experimentos; asimismo, se comprobó a un nivel de significancia de 0.05, que existen evidencias para afirmar que las varianzas de los tratamientos son homogéneas.

Considerando que los valores obtenidos resultaron aceptables y las varianzas homogéneas, se utilizó el software SPSS para procesar los promedios de turbidez residual con el estadístico ANOVA, a un nivel de significancia de 0.05, con lo cual, se comprobó que existen evidencias para afirmar que las seis dosis del coagulante natural aplicados son diferentes estadísticamente o al menos una de las dosis es diferente significativamente a las demás; asimismo, las seis concentraciones del coagulante natural preparadas son diferentes estadísticamente o al menos una de las concentraciones es diferente significativamente a las demás; así también, las seis dosis del coagulante natural, y los tres valores de pH inicial de las muestras de agua, así como, la interacción de estos (dosis del coagulante natural y pH muestra), son diferentes estadísticamente o al menos uno de ellos es diferente significativamente a los demás.

Por último, los promedios de turbidez residual fueron procesados con el estadístico Dunnett a un nivel de significancia de 0.05, resultando que la dosis óptima del coagulante natural es diferente significativamente a las demás dosis aplicadas; de igual manera, la concentración óptima del coagulante natural es diferente significativamente a las demás concentraciones.

4.1.6 Determinación de la ecuación de regresión

Conforme a la metodología planteada por el CEPIS/OPS en el capítulo 11 “Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades” del Manual I: Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, se analizó la existencia de correspondencia entre los valores iniciales de turbiedad de las muestras y las dosis óptimas.

En la Tabla 24 se presentan las dosis óptimas de las muestras con los valores de turbiedad residual y los porcentajes de remoción de turbidez, al emplear la dosis óptima del coagulante natural por cada nivel de turbidez.

Tabla 24: Turbidez residual vs dosis óptima

Turbidez inicial (UNT)	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad residual Promedio (UNT)	Porcentaje de remoción de turbidez (%)
20	30	10.06	49.72
50	45	23.98	52.04
100	55	28.88	71.12
300	75	67.26	77.58
500	90	74.85	85.03

FUENTE: Elaboración propia.

A partir de los resultados presentados en la Tabla 24 se realizó la correspondencia de los valores de las dosis óptimas con la turbidez inicial de las muestras.

En la Figuras 35 se presenta la correlación existente entre la turbidez inicial de las muestras y la dosis óptima del coagulante natural; asimismo, se presentan la recta de regresión lineal y su respectiva ecuación de correlación.

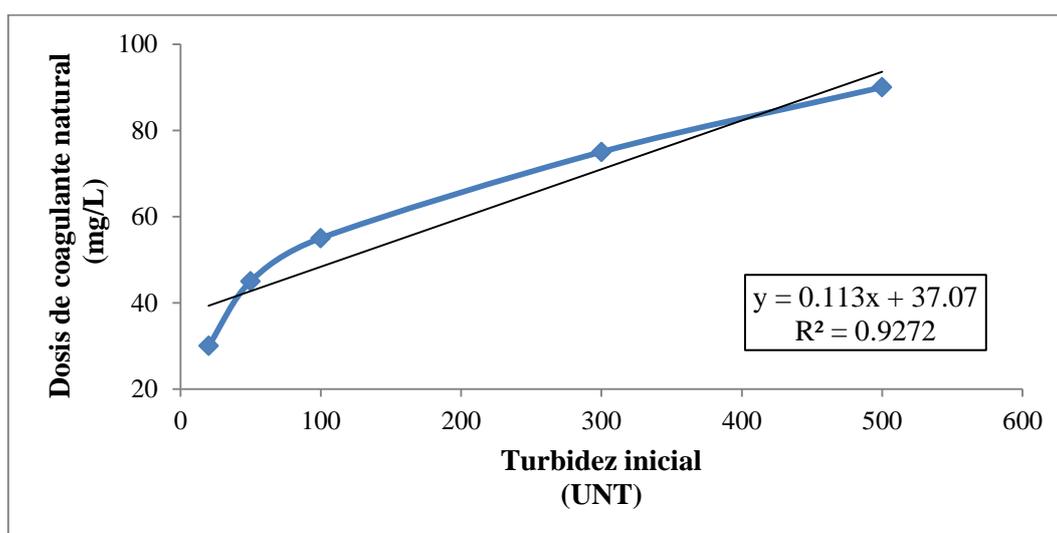


Figura 35: Correlación turbidez inicial y dosis del coagulante natural

Al respecto, se verifica que la recta de regresión lineal tiene pendiente positiva, lo cual indica que a mayor nivel de turbidez de la muestra, se necesita una mayor dosis del coagulante natural; asimismo, a partir del coeficiente de determinación calculado ($R^2 = 0.9272$) se desprende que el 92.7% del comportamiento de la dosis del coagulante natural se explica de acuerdo al nivel de turbidez del agua.

De igual manera, considerando el coeficiente de correlación ($r = 0.963$), se advierte una correlación positiva muy fuerte entre la dosis del coagulante y el nivel de turbidez inicial de la muestra.

Por lo expuesto, tanto el valor de R^2 como el de r son indicadores de una buena asociación entre los valores de la dosis del coagulante natural y el nivel de turbidez inicial del agua; por lo cual, las ecuaciones de regresión obtenidas pueden servir para determinar la dosis óptima del coagulante natural que se empleará para diferentes niveles de turbidez inicial del agua.

4.2 Evaluación de variación de parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua

Durante la ejecución de las pruebas de jarras se midieron los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua, antes y después de cada prueba, a fin de evaluar el efecto del coagulante natural (cactus *Opuntia ficus-indica*) y químico (Sulfato de aluminio) al ser aplicados en las muestras.

Los valores finales de los parámetros fisicoquímicos: turbiedad, conductividad, color y pH, registrados después de aplicar el coagulante natural o químico se presentan en los Anexos 1, 2 y 3; en los cuales se indican los coeficientes de variabilidad (CV) de los valores obtenidos, los cuales se encuentran en el intervalo de 0 a 10 ($0 < CV \leq 10$), lo que refleja una buena precisión en la ejecución de los experimentos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por cada parámetro fisicoquímico medido:

4.2.1 Turbiedad residual

Conforme a los resultados de turbidez residual obtenidos al determinar los parámetros óptimos (dosis, concentración y pH) de los coagulantes, se han considerado los valores con los cuales se obtuvo una mayor eficiencia en la remoción de turbidez en el tratamiento de las muestras preparadas, los cuales se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25: Turbidez residual del coagulante natural y químico

Turbidez inicial	Coagulante natural <i>Opuntia ficus-indica</i>		Coagulante químico Sulfato de aluminio	
	Turbiedad residual promedio	Porcentaje de remoción de turbidez	Turbiedad residual promedio	Porcentaje de remoción de turbidez
UNT	UNT	%	UNT	%
20	8.35	58.25	1.20	94.00
50	20.36	59.27	1.28	97.45
100	26.72	73.28	1.35	98.65
300	64.29	78.57	0.61	99.80
500	70.63	85.87	1.13	99.77

FUENTE: Elaboración propia.

En base a los valores registrados en la Tabla 25, se presenta en la Figura 36 la comparación de la remoción de turbiedad al utilizar el coagulante natural y químico.

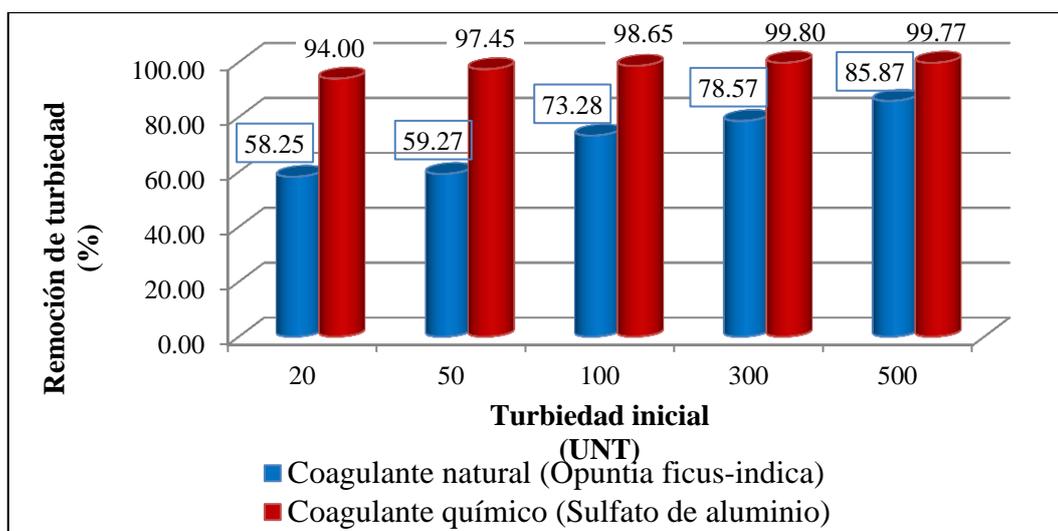


Figura 36: Remoción de turbiedad al aplicar el coagulante natural y químico

Los resultados indican que el coagulante químico fue más eficiente que el coagulante natural al remover la turbidez por encima del 94% en muestras de 20 UNT a 500 UNT; sin embargo, se debe señalar que el coagulante natural removió la turbidez de dichas muestras con una eficiencia entre el 58% y 86%, siendo de resaltar que su acción coagulante mejoró significativamente conforme la turbidez inicial de las muestras de agua se incrementaba.

Lo indicado concuerda con la bibliografía consultada, donde se indica que los coagulantes naturales son más eficientes en muestras de turbiedad alta; al respecto, Quiros *et al.* (2010) indicó que el cactus utilizado para la remoción de turbiedad mostró un mejor desempeño como coagulante en muestras de agua con turbidez superior a 100 UNT, asimismo, indicó que la remoción de turbidez con el cactus se incrementó al aumentar la turbidez inicial. De igual manera, Yarahmadi *et al.* (2009) menciona que el coagulante natural utilizado (semilla de *Moringa oleífera*) demostró mayor eficiencia en muestras con turbidez alta (500 UNT y 1000 UNT) en comparación de las muestras de turbiedad baja (10 UNT y 50 UNT).

La eficiencia del coagulante natural *Opuntia ficus-indica* en muestras de alta turbiedad puede explicarse porque la presencia de una mayor cantidad partículas coloidales mejora la fuerza de atracción de las mismas al estar más próximas, además, al agregar el coagulante natural, siendo su principal componente un polímero (mucílago), estando una mayor cantidad de coloides, se favorece la formación de puentes, y con ellos su aglutinamiento y la formación de flóculos para que puedan sedimentar (Richter 1984 y Andía 2000). Asimismo, la disminución de la efectividad en muestras de baja turbiedad puede explicarse porque en estas muestras se requiere aplicar una mayor cantidad del coagulante ya que las partículas coloidales se encuentran más dispersas y la fuerza de atracción es débil, así se tiene que Fuentes *et al.* (2011) aplicó 400 ppm de coagulante natural (cactus *Stenocereus griseus*) y removió el 80% de turbidez, produciendo el efecto de barrido en las partículas coloidales.

De otro lado, considerando que el pH inicial de las muestras de agua influye directamente en el proceso de remoción de turbidez, ya que determina las condiciones óptimas para la formación de flóculos capaces de precipitar (Gurdián *et al.* 2011, citado por Olivero *et al.* 2013), se comprobó que el coagulante natural demostró mayor eficiencia en la remoción de turbidez cuando se emplearon muestras con pH 9, seguidamente de las muestras con pH 7.

De manera similar, Miller *et al.* (2008) reportó que la actividad de coagulación del *Opuntia spp* fue mayor en aguas básicas en un rango de pH 8-10, mientras que, Yang *et al.* (2008), señala que el mucílago *Opuntia* se comporta como un coagulante eficaz en aguas con rango de pH entre 7 y 10.

Considerando lo mencionado, se advierte que las condiciones de las muestras tratadas de 20, 50 y 100 UNT al presentar valores de pH entre 6.70 y 7.24 no fueron favorables para el coagulante natural en la remoción de turbidez, por lo cual, su efectividad fue mayor en las muestras de 300 y 500 UNT con pH 7.75 y 8.30, alcanzado la remoción de turbidez entre el 78% y 86%.

Al respecto, también se debe tener en cuenta lo mencionado por Andía (2000), quien señala que si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo, entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante para obtener mejores resultados, por lo cual, resulta necesario realizar un análisis costo-beneficio y evaluar la conveniencia del tratamiento del agua aplicando la dosis óptima con modificadores de pH, o añadir una mayor cantidad de coagulante sin modificar el pH de la muestra.

Por su parte, el coagulante químico obtuvo mejores resultados en la remoción de turbiedad en las muestras de 20 - 500 UNT, cuyo pH estuvo entre 6.70 - 8.30, así como, en las muestras con pH modificado a 7, sin embargo su eficiencia disminuyó en muestras de pH 5 y pH 9. Lo descrito concuerda con Schulz *et al.* (1998), citado por Solís *et al.* (2012), quién señala que con el sulfato de aluminio, la formación óptima de flóculos ocurre en un intervalo de pH entre 6-8; asimismo, Rodríguez *et al.* (2008), citado por Olivero *et al.* (2013), menciona que el alumbre es efectivo como coagulante en aguas con pH entre 5,5 y 8.

Por lo expuesto, se concluye que el coagulante químico sulfato de aluminio presentó un mayor porcentaje de remoción de turbidez en las muestras de agua de 20, 50, 100, 300 y 500 UNT, en comparación con el coagulante natural *Opuntia ficus-indica*; no obstante, se ha comprobado que el referido cactus puede ser utilizado como coagulante natural, al haber obtenido porcentajes de remoción de turbiedad entre 58% - 86%, sin haber simulado el proceso de filtración, el cual ayudaría a mejorar posteriormente la remoción de material suspendido; asimismo, se ha demostrado que su efectividad mejora a medida que el nivel

de turbidez inicial se incrementa, y cuando el pH de las muestras se encuentre en el rango de 7 y 9.

4.2.2 pH residual

Durante el desarrollo de los ensayos de la prueba de jarras se verificó que no hubo una variación significativa del pH al aplicar las distintas dosis de los coagulantes (natural y químico) en un mismo nivel de turbidez, por lo cual, para evaluar y comparar este parámetro se ha considerado el valor promedio del pH residual obtenido de las pruebas ejecutadas en muestras con pH natural (obtenida de la prueba de dosis óptima), y pH modificado a 5, 7 y 9. En la Tabla 26 se presentan los valores promedio del pH residual de las muestras con cuatro valores de pH inicial (natural, 5, 7 y 9).

Tabla 26: Valores promedio de pH residual

Turbidez inicial (UNT)	pH inicial	pH final promedio	
		Coagulante natural <i>Opuntia ficus-indica</i>	Coagulante químico Sulfato de aluminio
20	pH 6.70	6.54	5.08
	pH 5	4.61	4.72
	pH 7	6.80	5.53
	pH 9	8.75	6.43
50	pH 6.93	6.69	5.05
	pH 5	4.82	4.66
	pH 7	6.82	5.39
	pH 9	8.81	6.04
100	pH 7.24	6.85	4.75
	pH 5	4.89	4.49
	pH 7	6.86	5.01
	pH 9	8.88	5.65
300	pH 7.75	7.16	4.74
	pH 5	4.91	4.48
	pH 7	6.92	4.92
	pH 9	8.86	5.35
500	pH 8.30	7.85	4.55
	pH 5	4.97	4.14
	pH 7	6.97	4.81
	pH 9	8.92	4.89

FUENTE: Elaboración propia.

En base a los valores de la Tabla 26, se representó en la Figura 37, Figura 38, Figura 39 y Figura 40, la variación del pH al aplicar el coagulante natural y químico, en muestras con cuatro valores de pH inicial (natural, 5, 7 y 9).

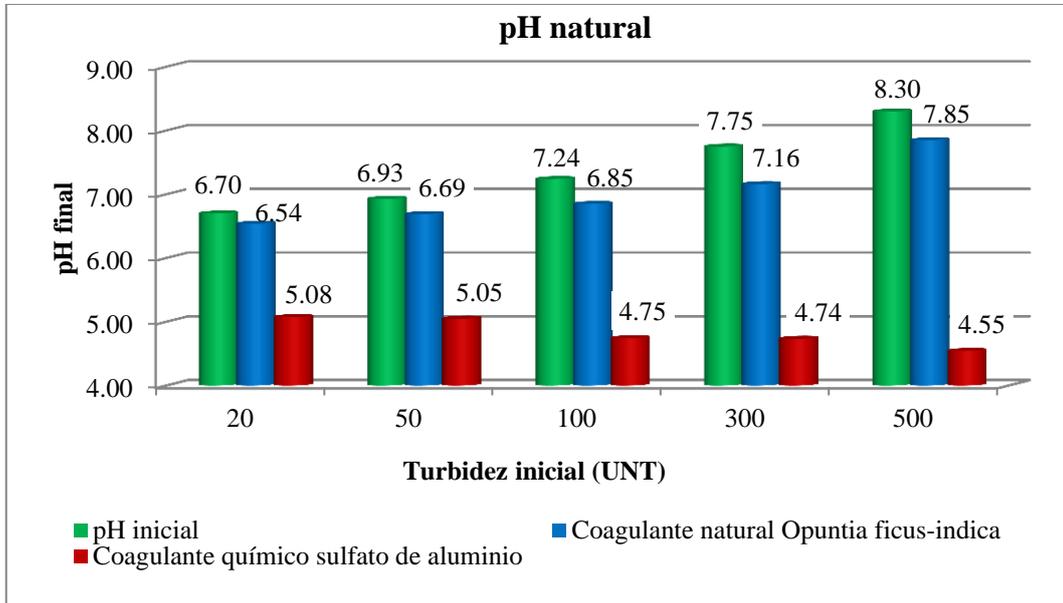


Figura 37: Variación del pH en muestras con pH natural

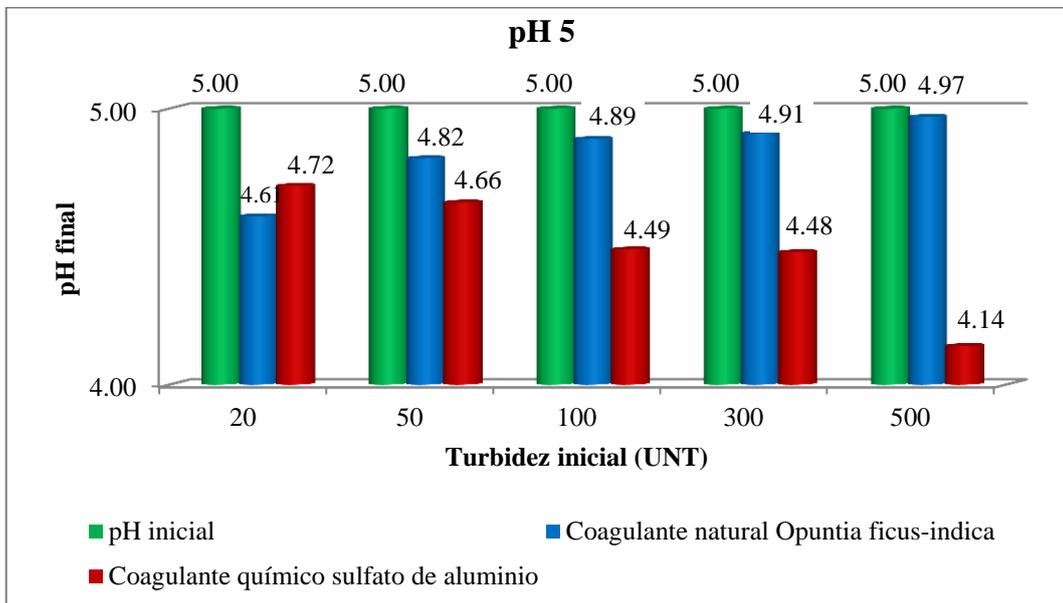


Figura 38: Variación del pH en muestras con pH 5

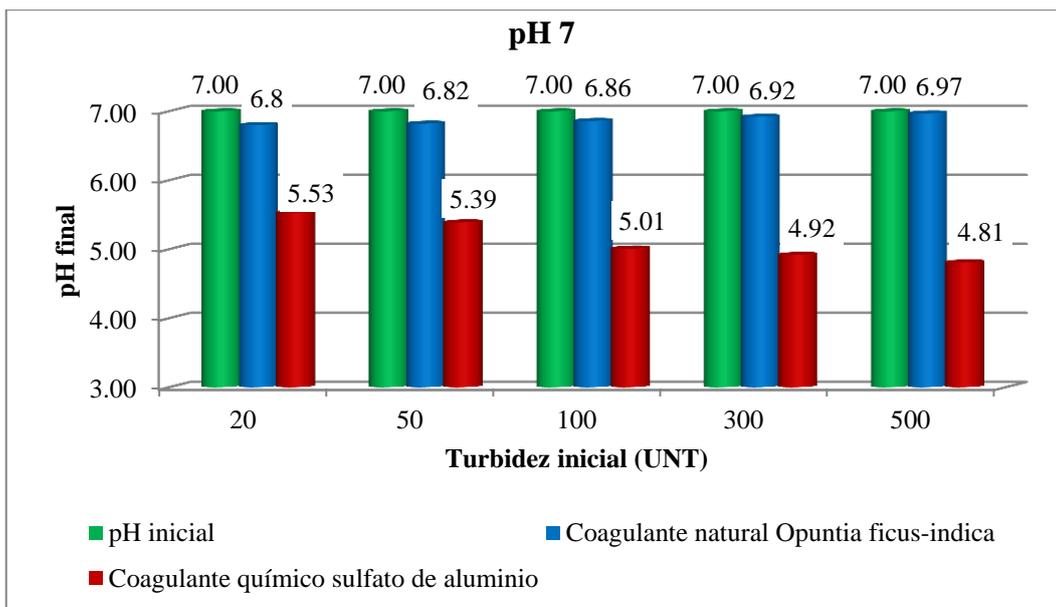


Figura 39: Variación del pH en muestras con pH 7

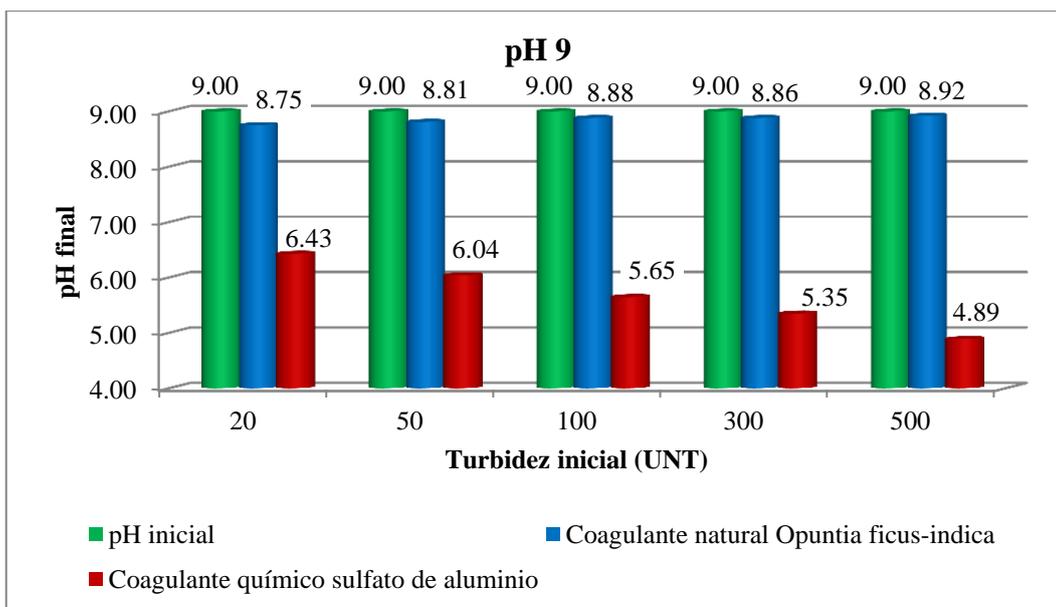


Figura 40: Variación del pH en muestras con pH 9

De acuerdo a los valores registrados, al agregar el coagulante natural *Opuntia ficus-indica* en las muestras de agua preparadas (20, 50, 100, 300 y 500 UNT), la variación del pH fue leve en todas las muestras tratadas, y no presentó variaciones significativas, por lo cual, se puede afirmar que la influencia del coagulante natural en la variación del pH es mínima.

Lo expuesto concuerda con el estudio de Yarahmadi *et al.* (2009), quién indica que el coagulante natural empleado (extracto de semilla de *Moringa oleífera*) tuvo un efecto

mínimo sobre el pH; así también, en los estudios de Narasiah *et al.* (1997) citado por Molano (2011) al emplear las semillas de *Moringa oleífera* confirma que el efecto de los coagulantes naturales en la variación del pH no es significativo. Esto también fue corroborado por Fuentes *et al.* (2011) y Parra *et al.* (2011), quienes trataron muestras de agua entre 20-100 UNT (pH 5,90-6,86) y 100-200 UNT (pH 7,60-7,82), aplicando el mucílago extraído de los cactus *Stenocereus griseus* y *Opuntia wentiana*, respectivamente, en los cuales, se registraron valores de pH finales entre 5,64-7,02 y 7,18-7,72; con lo cual se pueden advertir variaciones mínimas en el pH al emplear un coagulante natural, tal como se demostró en la presente investigación.

Por el contrario, al agregar el coagulante químico sulfato de aluminio se advirtieron variaciones considerables en el pH de las muestras tratadas, reduciendo en todos los casos el valor de pH; asimismo, esta disminución del pH se incrementó conforme el nivel de turbidez aumentaba, lo cual puede deberse a que en estas muestras se agregaba una dosis mayor del coagulante químico. Sobre el particular, Pérez (1965), citado en López *et al.* (2011) refiere que la hidrólisis del coagulante en el agua produce una disminución del pH, asimismo, Hernández *et al.* (2013), citado por Contreras *et al.* (2015), señala que el sulfato de aluminio es muy sensible al pH, por lo cual, con un pH no adecuado es posible que el aluminio se solubilice, reduciendo el pH de las muestras.

Lo expuesto se evidenció en las pruebas realizadas al aplicar el coagulante químico, de manera particular en las muestras con pH 5 y 9, y conforme el nivel de turbidez de las muestras aumentaba, ya que en estas se adicionaba una mayor cantidad de sulfato de aluminio. Este aspecto debe tenerse en cuenta para los procesos posteriores de tratamiento del agua en los que el pH represente un factor influyente en su desarrollo, y de corresponder, según Vargas *et al.* (2004), ajustar el pH del agua tratada hasta un valor que no produzca efectos corrosivos ni incrustantes; asimismo, indica que el pH del agua debería oscilar entre 5 y 9, ya que en ese rango se pueden controlar los efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua; por lo cual, de considerarlo necesario, a fin de contrarrestar la acidez del agua tratada se tendría que añadir un modificador de pH en el caso de utilizar el coagulante de aluminio. Por otro lado, en el caso que no sea posible ajustar el pH de las muestras o se quiera mantener a ese nivel, resulta ventajoso el coagulante natural *Opuntia ficus-indica* sobre el coagulante químico sulfato de aluminio,

ya que se ha demostrado que al aplicar el coagulante natural el pH no sufre variaciones significativas.

4.2.3 Conductividad residual

La conductividad es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica, por lo cual, son las sustancias que se encuentran disueltas en el agua las que proporcionan la capacidad de conducir la corriente eléctrica, por lo cual, esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas (Espinoza *et al.* 2014).

Para evaluar y comparar el parámetro conductividad se han considerado los resultados obtenidos en la prueba de dosis óptima de ambos coagulantes (natural y químico), en la cual, se puede apreciar directamente la variación de este parámetro. En la Tabla 27 se presentan los valores máximos, mínimos y promedios de la conductividad residual de las muestras.

Tabla 27: Valores promedio de la conductividad final

Turbidez inicial (UNT)	Conductividad inicial (µS/cm)	Conductividad final (µS/cm)					
		Coagulante natural <i>Opuntia ficus-indica</i>			Coagulante químico Sulfato de aluminio		
		mínimo	máximo	promedio	mínimo	máximo	promedio
20	12.37	12.70	16.53	14.62	26.37	67.20	46.79
50	22.80	22.47	26.5	24.49	43.4	82.43	62.92
100	28.60	31.47	33.97	32.72	68.9	101.93	85.42
300	49.00	51.43	53.93	52.68	88.83	123.07	105.95
500	71.50	74.20	75.83	75.02	119.23	154.70	136.97

FUENTE: Elaboración propia.

En base a los valores de la Tabla 27, se presenta en la Figura 41 la variación de los valores promedio de la conductividad residual, al haber aplicado el coagulante natural y químico en muestras de 20 – 500 UNT.

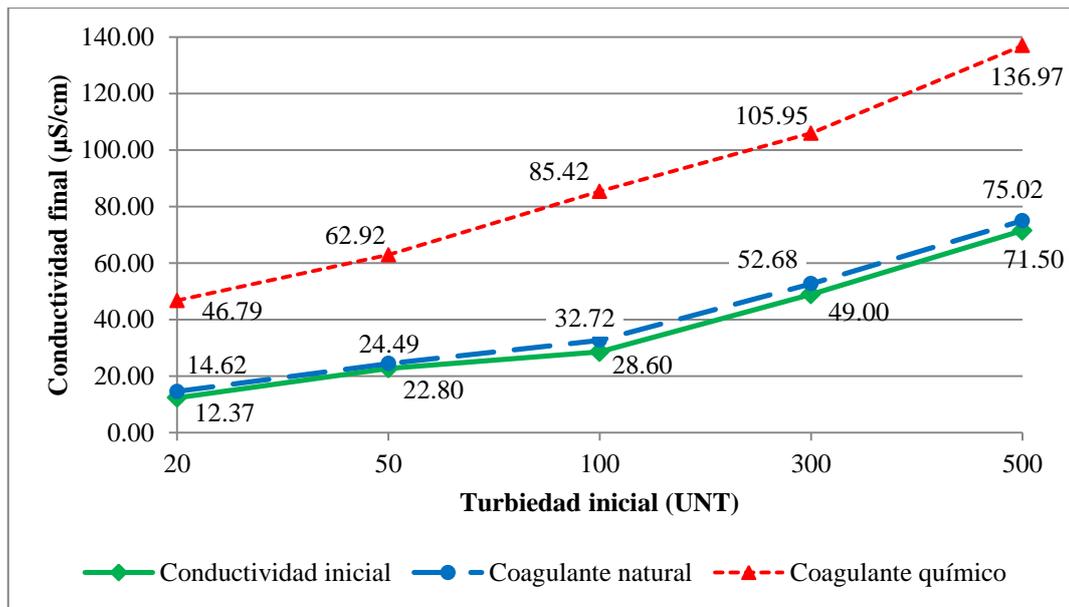


Figura 41: Variación de la conductividad al aplicar el coagulante natural y químico

Los valores registrados en la Tabla 27, y tal como se aprecia en la Figura 41, el efecto del coagulante natural en la conductividad de las muestras preparadas no es significativo, ya que solo presenta una ligera variación; de manera similar, Narasiah *et al.* (1998) citado en Molano (2011), estableció que el empleo de otro coagulante natural (semillas de *Moringa oleífera*) en el tratamiento de aguas no produce cambios significativos en los valores de conductividad; lo cual puede explicarse porque los coagulantes naturales contienen polímeros que incrementan ligeramente la carga iónica del agua, ya que su carga iónica no es elevada (Molano 2011).

Por el contrario, al añadir el coagulante químico en las muestras se advierte una variación considerable en la conductividad; asimismo, esta medida se incrementó significativamente en niveles superiores de turbiedad en los cuales se agregaron dosis mayores del coagulante.

Al respecto, según Hernández *et al.* (2013), citado por Contreras *et al.* (2015), el sulfato de aluminio es muy sensible al pH, por lo cual, con un pH no adecuado es posible que el aluminio se solubilice, incrementando la presencia de iones disueltos y con ello la conductividad; por lo cual, considerando que las muestras de 100 UNT, 300 UNT y 500 UNT presentaron 7.24, 7.75, y 8.30, valores que no se encuentran en el rango del pH óptimo del coagulante químico, esto explicaría que el coagulante químico se haya solubilizado, lo que habría ocasionado el aumento de la conductividad.

Con esto se aprecia que el coagulante químico sulfato de aluminio es más soluble en el agua en comparación con el *Opuntia ficus-indica*, bajo las mismas condiciones, lo cual se comprobó en los valores de conductividad final de las muestras, que reflejan una mayor cantidad de electrolitos y sólidos disueltos capaces de conducir la electricidad en el agua, los cuales provienen de la disolución del coagulante, lo cual refiere la presencia de aluminio residual en el agua tratada.

Al respecto, Van Benchosten *et al.* (1990), Boisvert *et al.* (1997) y Najm *et al.* (1998), citado por García (2007), coinciden que el uso de coagulantes de origen sintético para la potabilización se encuentra relacionada con problemas ambientales (generación de lodos tóxicos) y problemas de salud (Alzheimer y enfermedades neurodegenerativas); por lo cual, se puede considerar una ventaja de parte del coagulante natural *Opuntia ficus-indica* respecto al coagulante químico, ya que no se asocia a la generación de material residual perjudicial para el ambiente y la salud.

4.2.4 Color residual

El rango del color inicial en las muestras de 20 – 500 UNT estuvo entre 8 y 39 UCV escala Pt/Co, respectivamente. Durante el desarrollo de los ensayos de la prueba de jarras se verificó que no hubo o era mínima la variación del color al aplicar las distintas dosis de los coagulantes (natural y químico) en un mismo nivel de turbidez.

Asimismo, teniendo en cuenta que la relación entre color y pH no es directa, tal como señala Vargas *et al.* (2004) en el documento del CEPIS, lo cual se corroboró en esta investigación; al no advertir una relación directa entre estos parámetros, es que se compararon los valores promedios del color residual obtenidos al ejecutar las prueba de jarras para determinar los parámetros óptimos de los coagulantes.

En la Tabla 28 se presenta el promedio del color residual registrado por cada nivel de turbidez durante las pruebas de jarras.

Tabla 28: Color residual al aplicar el coagulante natural y coagulante químico

Turbidez inicial	Color inicial	Coagulante natural <i>Opuntia ficus-indica</i>		Coagulante químico Sulfato de aluminio	
		Color residual	Remoción de color	Color residual	Remoción de color
UNT	UCV Pt/Co	UCV Pt/Co	%	UCV Pt/Co	%
20	8.00	10.00	0.00	3.00	62.50
50	13.00	13.00	0.00	3.00	76.92
100	17.00	16.00	5.88	3.00	82.35
300	25.00	17.00	32.00	3.00	88.00
500	39.00	20.00	48.70	3.00	92.31

FUENTE: Elaboración propia.

En base a los valores de la Tabla 28, se presenta en la Figura 42 la remoción de color al utilizar el coagulante natural y químico.

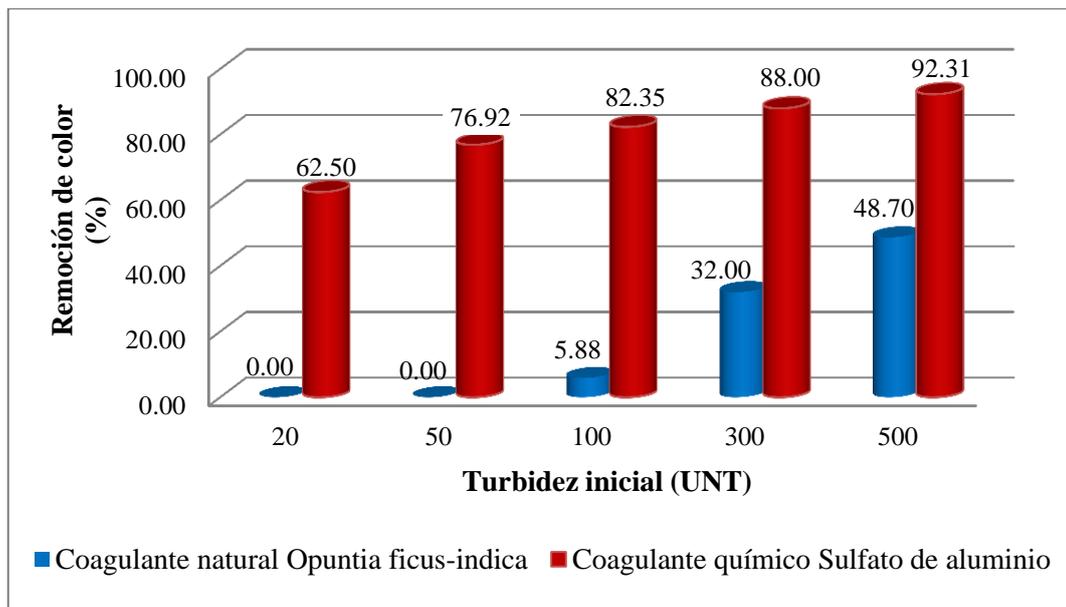


Figura 42: Remoción de color al aplicar el coagulante natural y químico

De acuerdo a los resultados, el coagulante químico fue superior en la remoción de color, en comparación con el coagulante natural, siendo el resultado del color residual en todas las pruebas de 3 UCV escala Pt/Co, por lo cual, teniendo en cuenta el color inicial de las muestras, el rango de la remoción del color fue entre 62% al 93%, donde se obtuvo mayor

remoción en niveles de turbiedad superiores (300 UNT y 500 UNT) ya que en estas condiciones el coagulante fue más efectivo en la remoción de las partículas coloidales.

Al aplicar el coagulante natural, en todos los casos no se consiguió un color estéticamente aceptable, ya que presentó una consistencia viscosa y lechosa, asimismo, en muestras con turbiedades bajas (20 UNT y 50 UNT) no se efectuó remoción del color; no obstante, si bien la remoción del color se incrementó en muestras de turbiedad alta (300 UNT y 500 UNT), la remoción de color fue menor al 50%, lo cual puede explicarse por la presencia de compuestos orgánicos en el coagulante natural sin actividad coagulante-floculante.

Sobre el particular, de acuerdo a la bibliografía consultada, los resultados de remoción de color se contraponen, así, se tiene que Fuentes *et al.* (2011) al trabajar con el cactus *Stenocereus griseus* en muestras de agua diluida de un rango de 20 a 100 UNT, obtuvo que los valores de color se redujeron desde 30-100 UC Pt/Co hasta 15-30 UC Pt/Co, lo que representa una remoción del color entre 16.67% y 80%, registrando la máxima remoción de color por encima de la presente investigación, sin embargo, se debe señalar que las dosis del coagulante empleados por Fuentes *et al.* (2011) fueron superiores entre 300-600 ppm a las dosis aplicadas en esta investigación, lo que habría favorecido la remoción de las partículas responsables del color.

De otro lado, Jiménez *et al.* (2012) y Parra *et al.* (2011), quienes emplearon los cactus *Opuntia cochenillifera*, y *Opuntia wentiana*, respectivamente, señalaron que el parámetro color no fue removido, al tratar muestras con valores de color altos (85-475 UC), medios (≥ 100 UC Pt/Co) y bajos (5-10 UCV); siendo de señalar que Jiménez *et al.* (2012) atribuyó este resultado a la presencia de sustancias húmicas en aguas de baja turbidez y alcalinidad, además de una alta saturación de oxígeno disuelto que se libera con el aumento de la temperatura, lo que tiende a dificultar la precipitación de los flóculos formados en el tratamiento.

Así también, Arboleda (2000), citado por Jiménez *et al.* (2012), señala que la baja turbidez desestimula la adsorción de las partículas responsables del color. De igual manera, Parra *et al.* (2011) señaló que al tratar muestras de alta turbiedad y presencia de sedimentos que no

podieron ser removidos, las dosis aplicadas no fueron suficientes, lo que podría haber favorecido la re-estabilización de los coloides presentes en el agua.

Adicionalmente, Arboleda (2000) citado por Jiménez *et al.* (2012), menciona que los flóculos que forman el color son muy livianos y quebradizos y la presencia de turbidez puede darle más peso y cohesión, lo que mejora el proceso de sedimentación; con esto se explica que en muestras de agua con niveles de turbidez bajo no fue favorable la adsorción del coagulante a las partículas responsables del color, y que la remoción de color fue incrementándose en muestras de turbiedad alta por la presencia de turbidez que mejoró la cohesión de las partículas y sedimentación de las mismas, lo cual se comprobó en la presente investigación..

V. CONCLUSIONES

1. En esta investigación se determinaron los parámetros óptimos del coagulante natural en polvo obtenido del cactus *Opuntia ficus-indica*, al ser aplicado en muestras de agua de 20, 50, 100, 300 y 500 UNT; asimismo, se comprobó la eficiencia del coagulante al remover la turbidez de dichas muestras; por último, se evaluaron los parámetros físico-químicos finales de las muestras de agua (turbidez, color, pH y conductividad), al utilizar el coagulante natural y el coagulante químico sulfato de aluminio, a fin de verificar y comparar el efecto de cada coagulante en la variación de dichos parámetros.
2. Las dosis óptimas del coagulante natural estuvieron en el rango de 30 y 90 mg/L, con lo cual, se evidencia que no se necesitan grandes cantidades del coagulante en polvo para el tratamiento del agua, ya que las dosis aplicadas no superaron los 100 mg de coagulante en un litro de agua tratada.
3. La concentración óptima del coagulante natural estuvo en el rango de 0.5% y 2%; al respecto, se advirtió que la concentración óptima del coagulante natural disminuyó a medida que el nivel de turbidez se incrementaba; es así que, para muestras de turbidez baja (20-50 UNT) la concentración óptima fue del 2%; para muestras de turbiedad media-alta (100-300 UNT) fue del 1%; y para muestras de 500 UNT fue de 0.5%.
4. El pH óptimo del coagulante natural en todas las muestras de agua fue 9, con lo cual, se comprobó que el pH es un factor que influye en el proceso de coagulación, ya que al aplicar el coagulante natural en muestras de pH 9 se obtuvo mejores resultados en la remoción de turbiedad, seguidamente en muestras de pH 7; y su eficiencia disminuyó al tratar muestras de pH 5.

5. La eficiencia del coagulante natural hecho a base del cactus *Opuntia ficus-indica*, para remover la turbidez presente en muestras de agua de 20 a 500 UNT, fue menor a la del coagulante químico sulfato de aluminio, ya que este alcanzó porcentajes de remoción superiores al 94%; no obstante, la eficiencia del coagulante natural en la clarificación del agua mejoró considerablemente en niveles altos de turbidez, removiendo desde 58% de turbidez en muestras de 20 UNT hasta el 86 % de turbidez en muestras de agua de 500 UNT; esto se puede explicar porque las especies del género *Opuntia spp.* actúan por el mecanismo de adsorción y formación de puente
6. Se comprobó que el coagulante natural hecho a base del cactus *Opuntia ficus-indica* no altera significativamente las condiciones iniciales de los parámetros fisicoquímicos de pH y conductividad, en muestras de agua de 20 a 500 UNT; sin embargo, al emplear el coagulante químico sulfato de aluminio se observó un incremento considerable en los valores de conductividad y disminución del pH, con lo cual, se deduce la presencia de aluminio residual en las muestras.
7. En la remoción del color de las muestras de 20-500 UNT, el coagulante natural hecho a base del cactus *Opuntia ficus-indica* no fue eficiente, en comparación con el coagulante químico sulfato de aluminio, alcanzando hasta 49% en la remoción del color en muestras de agua de 500 UNT; mientras que el coagulante químico logró una remoción de color del 92%. La baja efectividad del coagulante natural en la remoción de color puede explicarse por la presencia de compuestos orgánicos sin actividad coagulante-floculante en la solución del coagulante natural; o porque la cantidad aplicada de coagulante no fue suficiente.
8. De acuerdo a los resultados de remoción de turbidez obtenidos al aplicar el coagulante natural *Opuntia ficus-indica* se puede afirmar que este es efectivo para ser aplicado en muestras de turbiedad bajas, medias y altas, mejorando su eficiencia en muestras de alta turbidez; asimismo, se comprobó que no genera variaciones significativas en la conductividad y pH de las muestras, lo cual puede representar una ventaja al no necesitar modificadores de pH.

Por lo expuesto, este coagulante natural puede considerarse como una alternativa para aplicar en el proceso de coagulación para el tratamiento de aguas.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se debe continuar con los estudios que comprueban el potencial de los coagulantes naturales, entre ellos, el cactus *Opuntia ficus-indica*, estas investigaciones deben ser aplicados en muestras de agua que presenten diferentes características fisicoquímicas, con la finalidad de establecer en cuáles condiciones estos coagulantes naturales son más eficientes para el tratamiento del agua, y proponerlos como alternativas en lugar del uso de coagulantes químicos.
2. Se deben tener en cuenta los parámetros óptimos de los coagulantes naturales que se investiguen, a fin de determinar la máxima remoción de turbiedad en tales condiciones, y con ello, proponerlos en reemplazo de los coagulantes químicos.
3. Se deben investigar los efectos en la salud y el ambiente al usar los coagulantes químicos en el tratamiento del agua, a fin de optar, de ser el caso, por otras alternativas de coagulantes que sean inocuos, y que otorguen beneficios económicos y ambientales.
4. Se debe considerar proponer procesos complementarios al proceso de coagulación usando coagulantes naturales, como pruebas de filtración y sedimentación, con la finalidad de verificar la calidad del agua y comparar sus parámetros con la normativa aplicable.
5. La prueba de jarras y medición de parámetros de la calidad del agua, se debe de realizar de manera adecuada, cuidando de cumplir con los procedimientos y metodología referida en la bibliografía consultada, a fin de disminuir el error en los resultados que podría producirse por una inadecuada operación de los equipos y materiales de laboratorio.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Almendárez, N. 2004. Comprobación de la efectividad del coagulante (cochifloc) en aguas del Lago de Managua “Piedras Azules”. Revista Iberoamericana de Polímeros. 5(1).
2. Andía, Y. 2000. Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Tratamiento de Agua: Coagulación Floculación. Lima, Perú. SEDAPAL.
3. Carpinteyro, S. 2011. Tratamiento de aguas residuales empleando polímeros naturales y biodegradabilidad de los lodos generados. Tesis Mg Sc. México. Inst. Politécnico Nacional. 150p.
4. Contreras, K; Mendoza, Y; Salcedo, G; Olivero, R; Mendoza, G. 2015. El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. Revista Producción + Limpia. 10(1): 40-50.
5. Espinoza, V; Castillo, R; Rovira, D. 2014. Manual Parámetros físico-químicos y microbiológicos como indicadores de la calidad de las aguas de la sub-cuenca baja del río David, provincia de Chiriquí, Panamá. Universidad Tecnológica Oteima.
6. Fera, J; Rodiño, J; Gutiérrez, G. 2016. Comportamiento de la turbidez, pH, alcalinidad y color del agua del río Sinú tratada con coagulantes naturales. Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquía. 78 (1): 119-128.
7. Fuentes, L; Mendoza, I; López, A; Castro, M; Urdaneta, C. 2011. Efectividad de un coagulante extraído de *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. en la potabilización del agua. Revista Tecnológica de Ingeniería. Universidad de Zulia. 34(1): 48-56.

8. García, B. 2007. Metodología de extracción in situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo. Tesis Mg. Seguridad industrial y medioambiente. Universidad Politécnica de Valencia. 120p.
9. Gordón, R.; Camargo, I. 2015. Selección de estadísticos para la estimación de la precisión experimental en ensayos de maíz. *Mesoamerican Agronomy*. 26 (1): 55-63.
10. Guzmán, L; Villabona, A; Candelaria, R. 2013. Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica* 16(1): 253-262.
11. Jiménez, J; Vargas, M; Quirós, N. 2012. Evaluación de la tuna (*Opuntia cochenillifera*) para la remoción del color en agua potable. *Tecnología en Marcha*. 25(4):55–62.
12. Kirchmer, C. 1983. *Criterios y Normas de Calidad de Aguas – Agua Potable*. Lima, PE. CEPIS.
13. Laines, J; Goñi, J; Howard, A; y Camacho, W.2008. Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. *Interciencia*. 33 (1)
14. Ledo, P; Lima, R; Duarte, M; Paulo, J. 2009. Estudio comparativo de sulfato de aluminio y semillas de Moringa oleifera para la depuración de aguas con baja Turbiedad. *Universidad Federal do Rio Grande do Norte*. Brasil. *Centro de Tecnología*. 20(5): 3-12.
15. López, R; Laines, J; Hernández, J. 2011. Uso potencial de agentes de origen vegetal para la remoción de turbiedad en el tratamiento de aguas superficiales. *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*. ME.
16. *Manual de cultivo de tuna (Opuntia ficus-indica)*. 2009. Gobierno Regional La Libertad. Trujillo, Perú.

17. Martínez, D; Chávez, M; Altamira, D; Elsa, C; Nola, F. 2003. Eficiencia del *Cactus lefaria* para su uso como coagulante en la clarificación de aguas. Revista Tecnológica. Facultad de Ingeniería. Universidad. (RTFIUZ). 26 (1): 27-33.
18. Miller, S; Fugate, E; Oyanedel, V; Smith, J; Zimmerman, J. 2008. Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia spp.* as a natural coagulant for potential application in water treatment. Environmental Science Technology. 42 (12): 4274 - 4279.
19. Molano, L. 2011. Las semillas de Moringa *Oleífera Lam* como alternativa de coagulante natural para purificación de agua. Título de Especialidad. Universidad de Santander. Bucaramanga.
20. Monserrat, F. 2012. Modificación de biopolímero extraído de nopal (*Opuntia ficus indica*) y su aplicación para la remoción de metales pesados en agua. Tesis. Mg. Ciencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnología A.C.
21. Nieto, C; Orellana, V. 2011. Aplicación del quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante. Universidad Politécnica Salesiana. ME.
22. Olivero; R; Mercado, I; Montes, L. 2013. Remoción de la turbidez del agua del río Magdalena usando el mucílago del nopal *Opuntia ficus-indica*. Producción + Limpia. 8 (1): 19 - 27
23. Ostolaza, C. 2011. 101 cactus del Perú. Lima, PE. MINAM. 253 p.
24. Ostolaza, C. 2014. Todos los cactus del Perú. Lima. PE. MINAM. 538 p.
25. Parra, Y; Cedeño, M; García, M; Mendoza, I; González, Y; Fuentes, L. 2011. Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de *Opuntia Wentiana* (Britton & Rose). REDIELUZ. 1 (1): 27-33.
26. Pérez, J. 1977. Estado del arte – Coagulación. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). PE.

27. Quirós, N; Vargas, M; Jiménez, J. 2010. Extracción y análisis de polímeros obtenidos a partir de varios productos naturales, para ser usados como potenciales floculantes en el tratamiento de agua para consumo humano. Costa Rica. CIPA.
28. Ramírez, L; Suárez, J; Ramírez, J. 2011. Evaluación de las propiedades floculantes de *Malvaviscus arboreus*, *Heliocarpus popayanensis* e *Hylocereus undatus* para clarificación de aguas. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. 2 (2): 33-42.
29. Restrepo, H. 2009. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Tesis Especialidad. Universidad Nacional de Colombia. Colombia
30. Richter, C; Pérez, J; Cánepa, L.1984. Coagulación. Lima, PE.CEPIS. 78 p.
31. Rodríguez, L; De Lira, C; Hernández, E; Cornejo, M; Palacios, A; Rojas, I. 2007. Physicochemical Characterization of Nopal Pads (*Opuntia ficus indica*) and Dry Vacuum Nopal Powders as a Function of the Maturation. Plant Foods Hum Nutrition. 62 (1): 107–112.
32. Rodríguez, L. 2006. Estabilidad de los Sistemas Coloidales. Departamento de Química Física- Universidad de Salamanca. ES.
33. Severiche, C; Castillo, M; Acevedo, R. 2013. Manual de Métodos Analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas. Cartagena de Indias, CO. Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso.
34. Solís, R; Laines, J; Hernández, J.2012. Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 28(3):229-236-.
35. Vargas, L; Barrenechea, A; Aurazo, M; Maldonado, V. 2004. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Tomo I. Lima, PE. CEPIS/OPS.

36. Vásquez, O. 1994. Extracción de coagulantes naturales del nopal y aplicación en la clarificación de aguas superficiales. Monterrey, México. Universidad Autónoma de Nuevo León.
37. Villabona, A; Paz, I; Martínez, J. 2013. Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. *Revista Colombiana Biotecnológica*. 15(1):137-144.
38. Weber, W. 1979. Control de la calidad del agua- Procesos fisicoquímicos. Pag. 66.
39. Yarahmadi, M; Hossieni, M; Bina, B; Mahmoudian, M; Naimabadie, A; Shahsavani, A. 2009. *World Applied Sciences Journal*. 7(8): 962-967.
40. Yang, Y; Abdul-Talib, S; Pei, L; Nisan, M; Aisah, S; Mahyuddin, A. 2008. A study on cactus *Opuntia* as natural coagulant in turbid water treatment. *Process Biochemistry*. 45 (9): 1437-1444.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Resultados dosis óptima del coagulante natural y coagulante químico

Anexo 1.1. Muestras de 500 UNT

Valores iniciales			Turbidez inicial : 500 UNT					pH inicial: 8.30					Conductividad inicial: 71.50 $\mu\text{S/cm}$					Color inicial: 39.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	70.00	1.00	91.21	90.32	93.62	91.72	1.86	8.05	8.02	8.10	8.06	0.50	74.20	73.50	74.90	74.20	0.94	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
2	75.00	1.00	87.57	84.57	90.25	87.46	3.25	7.97	7.95	8.00	7.97	0.32	73.70	74.30	76.10	74.70	1.67	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
3	80.00	1.00	84.21	80.32	85.62	83.38	3.29	7.85	7.83	7.89	7.86	0.39	73.40	72.90	75.20	73.83	1.64	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
4	85.00	1.00	80.47	82.25	80.58	81.10	1.23	7.76	7.79	7.71	7.75	0.52	74.50	72.20	75.20	73.97	2.12	20.00	20.00	23.00	21.00	8.25
5	90.00	1.00	75.25	72.46	76.84	74.85	2.96	7.67	7.63	7.71	7.67	0.52	75.40	73.60	76.10	75.03	1.72	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00
6	95.00	1.00	82.36	83.31	81.58	82.42	1.05	7.64	7.60	7.69	7.64	0.59	76.20	74.60	76.70	75.83	1.45	20.00	23.00	20.00	21.00	8.25
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	70.00	1.00	2.69	2.65	3.10	2.81	8.85	5.46	5.48	5.50	5.47	0.36	121.40	116.50	119.80	119.2	2.10	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	75.00	1.00	1.78	1.83	1.90	1.84	3.28	5.38	5.10	5.20	5.23	2.71	128.20	125.30	127.30	126.93	1.17	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	80.00	1.00	1.75	1.59	1.64	1.66	4.93	5.12	5.07	5.10	5.10	0.49	133.20	132.30	130.70	132.07	0.96	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	85.00	1.00	1.70	1.61	1.86	1.72	7.35	5.06	4.74	4.85	4.88	3.33	139.50	145.10	142.20	142.27	1.97	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	90.00	1.00	1.98	1.73	1.81	1.84	6.94	4.81	4.80	4.74	4.78	0.79	151.30	146.00	146.20	147.83	2.03	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	95.00	1.00	1.95	1.83	2.00	1.93	4.53	4.69	4.71	4.65	4.68	0.65	158.20	153.40	152.50	154.70	1.98	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 1.2. Muestras de 300 UNT

Valores iniciales	Turbidez inicial: 300 UNT	pH inicial: 7.75	Conductividad inicial: 49.00 μS/cm	Color inicial: 25.00 UCV
--------------------------	----------------------------------	-------------------------	--	---------------------------------

COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	60.00	1.00	84.56	93.25	90.72	89.51	4.99	7.21	7.37	7.25	7.28	1.14	51.20	54.10	53.50	52.93	2.89	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
2	65.00	1.00	76.26	77.37	76.19	76.61	0.86	7.15	7.17	7.20	7.17	0.35	51.30	52.40	50.60	51.43	1.76	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
3	70.00	1.00	74.73	78.49	73.14	75.45	3.64	7.12	7.18	7.14	7.15	0.43	52.50	53.20	51.90	52.53	1.24	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
4	75.00	1.00	64.83	67.36	69.58	67.26	3.53	7.05	7.09	7.12	7.09	0.50	53.60	53.40	54.80	53.93	1.40	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
5	80.00	1.00	73.34	77.18	75.78	75.43	2.58	7.06	7.01	7.05	7.04	0.38	54.30	52.80	52.10	53.07	2.12	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
6	85.00	1.00	81.45	78.37	82.75	80.86	2.78	7.16	7.11	7.13	7.13	0.35	54.40	53.10	53.80	53.77	1.21	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	45.00	1.00	1.89	1.76	2.07	1.91	8.16	5.31	5.48	5.39	5.39	1.58	90.30	86.80	89.40	88.83	2.05	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	50.00	1.00	1.04	1.18	0.99	1.07	9.20	5.10	5.25	5.23	5.19	1.57	92.80	93.40	95.50	93.90	1.51	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	55.00	1.00	1.03	0.97	0.85	0.95	9.65	5.00	5.12	5.06	5.06	1.19	97.80	98.80	102.20	99.60	2.32	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	60.00	1.00	0.81	0.77	0.70	0.76	7.33	4.83	5.11	4.92	4.95	2.89	104.90	106.20	107.60	106.23	1.27	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	65.00	1.00	1.28	1.19	1.07	1.18	8.93	4.62	4.81	4.70	4.71	2.03	114.60	115.20	120.00	116.60	2.54	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	70.00	1.00	2.25	1.92	2.08	2.08	7.92	5.12	5.74	4.87	5.24	8.54	125.30	118.20	125.70	123.07	3.43	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 1.3. Muestras de 100 UNT

Valores iniciales			Turbidez inicial: 100 UNT					pH inicial: 7.24					Conductividad inicial: 28.60 $\mu\text{S/cm}$					Color inicial: 17.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	40.00	1.00	40.12	39.27	37.46	38.95	3.49	6.98	6.91	6.93	6.94	0.52	31.50	30.70	32.20	31.47	2.39	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
2	45.00	1.00	37.23	35.75	35.69	36.22	2.41	6.77	6.81	6.82	6.80	0.39	31.90	32.80	32.40	32.37	1.39	15.00	15.00	17.00	15.67	7.37
3	50.00	1.00	31.64	32.45	33.27	32.45	2.51	6.74	6.77	6.85	6.79	0.84	33.20	34.50	33.30	33.67	2.15	15.00	17.00	15.00	15.67	7.37
4	55.00	1.00	28.27	30.59	27.78	28.88	5.20	6.76	6.83	6.80	6.80	0.52	33.10	34.40	33.70	33.73	1.93	17.00	17.00	15.00	16.33	7.07
5	60.00	1.00	34.78	36.68	35.25	35.57	2.78	6.79	6.82	6.84	6.82	0.37	33.50	34.60	33.80	33.97	1.67	17.00	15.00	15.00	15.67	7.37
6	65.00	1.00	38.83	36.71	39.74	38.43	4.05	6.73	6.78	6.76	6.76	0.37	33.40	32.10	32.90	32.80	2.00	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	35.00	1.00	1.48	1.62	1.60	1.57	4.83	5.09	5.34	4.94	5.12	3.94	69.60	73.00	64.20	68.93	6.44	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	40.00	1.00	1.57	1.58	1.46	1.54	4.33	4.58	4.74	4.49	4.60	2.75	75.60	78.80	72.10	75.50	4.44	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	45.00	1.00	1.44	1.51	1.39	1.45	4.17	4.55	4.56	4.18	4.43	4.89	81.60	84.60	79.30	81.83	3.25	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	50.00	1.00	1.53	1.50	1.47	1.50	2.00	4.44	4.5	4.2	4.38	3.62	90.30	92.30	87.80	90.13	2.50	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	55.00	1.00	1.56	1.72	1.62	1.63	4.95	4.4	4.48	4.32	4.40	1.82	95.20	99.50	93.30	96.00	3.31	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	60.00	1.00	1.78	1.84	1.80	1.81	1.69	4.4	4.42	4.3	4.37	1.47	101.50	106.70	97.60	101.93	4.48	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 1.4. Muestras de 50 UNT

Valores iniciales	Turbidez inicial: 50 UNT	pH inicial: 6.93	Conductividad inicial: 22.80 $\mu\text{S/cm}$	Color inicial: 13.00 UCV
--------------------------	---------------------------------	-------------------------	---	---------------------------------

COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	35.00	1.00	30.24	29.00	31.72	30.32	4.49	6.75	6.79	6.80	6.79	0.52	21.40	22.70	23.80	22.63	5.31	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
2	40.00	1.00	27.64	26.45	27.18	27.09	2.22	6.74	6.71	6.75	6.73	0.31	23.20	22.30	21.90	22.47	2.96	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
3	45.00	1.00	24.55	23.27	24.12	23.98	2.72	6.67	6.62	6.69	6.66	0.54	23.70	24.30	25.10	24.37	2.88	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
4	50.00	1.00	25.64	24.94	26.26	25.61	2.58	6.65	6.61	6.68	6.65	0.53	25.50	24.70	25.40	25.20	1.73	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
5	55.00	1.00	27.23	27.82	29.14	28.06	3.48	6.61	6.69	6.67	6.66	0.63	25.30	26.50	27.70	26.50	4.53	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
6	60.00	1.00	30.43	31.54	30.89	30.95	1.80	6.62	6.55	6.59	6.59	0.53	25.20	26.30	26.90	26.13	3.30	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	20.00	1.00	1.58	1.55	1.50	1.54	2.62	4.86	5.08	4.95	5.02	1.83	53.10	43.80	43.00	43.40	1.30	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	25.00	1.00	1.44	1.31	1.32	1.36	5.33	4.60	4.69	4.73	4.71	0.60	57.20	53.30	53.90	53.60	0.79	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	30.00	1.00	1.48	1.43	1.39	1.43	3.15	4.56	4.66	4.64	4.65	0.30	63.50	59.70	58.80	59.25	1.07	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	35.00	1.00	1.30	1.28	1.25	1.28	1.97	4.47	4.57	4.54	4.56	0.47	70.50	67.30	66.10	66.70	1.27	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	40.00	1.00	1.36	1.33	1.32	1.34	1.56	4.41	4.51	4.50	4.51	0.16	76.80	74.20	73.10	73.65	1.06	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	45.00	1.00	1.48	1.38	1.50	1.45	4.42	4.38	4.48	4.48	4.45	1.30	85.70	82.80	78.80	82.43	4.20	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 1.5. Muestras de 20 UNT

Valores iniciales			Turbidez inicial: 20 UNT					pH inicial: 6.70					Conductividad inicial: 12.37 $\mu\text{S/cm}$					Color inicial: 8.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	20.00	1.00	17.72	16.83	18.12	17.56	3.76	6.64	6.59	6.67	6.63	0.61	12.10	12.70	13.30	12.70	4.72	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
2	25.00	1.00	11.30	12.25	13.34	12.30	8.30	6.57	6.55	6.61	6.58	0.46	12.30	14.70	13.80	13.60	8.91	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
3	30.00	1.00	9.48	10.12	10.57	10.06	5.45	6.53	6.53	6.55	6.54	0.18	15.20	14.50	16.80	15.50	7.61	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
4	35.00	1.00	10.85	11.67	12.15	11.56	5.69	6.49	6.51	6.50	6.50	0.15	16.50	13.40	15.20	15.03	10.36	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
5	40.00	1.00	13.65	12.47	13.88	13.33	5.67	6.41	6.48	6.45	6.45	0.54	16.30	17.10	14.20	15.87	9.44	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
6	45.00	1.00	14.29	13.25	14.57	14.04	4.95	6.48	6.47	6.45	6.47	0.24	17.50	16.30	15.80	16.53	5.28	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	10.00	1.00	4.07	3.58	3.70	3.78	6.75	4.55	4.95	4.74	4.75	4.22	27.40	26.40	25.30	26.37	3.98	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	15.00	1.00	2.58	2.45	2.56	2.53	2.77	4.49	4.86	4.57	4.64	4.20	36.80	35.90	34.80	35.83	2.80	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	20.00	1.00	1.87	1.60	1.74	1.74	7.78	4.33	4.67	4.52	4.51	3.78	45.70	44.20	43.70	44.53	2.34	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	25.00	1.00	1.47	1.49	1.58	1.51	3.87	4.20	4.54	4.45	4.40	4.01	51.60	49.40	52.20	51.07	2.89	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	30.00	1.00	2.72	2.91	2.66	2.76	4.72	4.28	4.48	4.41	4.39	2.31	60.50	56.20	57.50	58.07	3.80	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	35.00	1.00	2.98	3.37	3.11	3.15	6.30	4.23	4.40	4.40	4.34	2.26	64.30	70.80	66.50	67.20	4.92	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 2. Resultados concentración óptima del coagulante natural y coagulante químico

Anexo 2.1. Muestras de 500 UNT

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 500 UNT					pH inicial 8.30					Conductividad inicial 71.50 μ S/cm					Color inicial 39.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μ S/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	90.00	0.10	75.27	76.92	77.81	76.67	1.68	7.54	7.32	7.47	7.44	1.51	68.20	69.30	67.60	68.37	1.26	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
2	90.00	0.50	70.74	72.46	71.40	71.53	1.21	7.61	7.58	7.74	7.64	1.11	72.30	70.20	70.20	70.90	1.71	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
3	90.00	1.00	76.37	74.53	74.29	75.06	1.52	7.78	7.74	7.70	7.74	0.52	69.60	71.50	70.30	70.47	1.36	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
4	90.00	2.00	78.23	76.65	76.21	77.03	1.38	7.68	7.71	7.65	7.68	0.39	72.30	71.40	73.90	72.53	1.75	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
5	90.00	5.00	77.24	79.43	78.15	78.27	1.41	7.73	7.66	7.70	7.70	0.46	72.30	74.50	74.80	73.87	1.85	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
6	90.00	10.00	84.23	81.31	89.72	85.09	5.02	7.70	7.65	7.68	7.68	0.33	70.40	73.50	72.80	72.23	2.25	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μ S/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	80.00	0.10	5.77	5.82	6.03	5.87	2.35	6.03	6.20	6.01	6.08	1.72	122.80	118.50	115.80	119.03	2.97	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	80.00	0.50	2.23	2.58	2.44	2.42	7.29	5.70	5.81	5.75	5.75	0.96	127.00	124.50	126.80	126.10	1.10	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	80.00	1.00	1.72	1.65	1.58	1.65	4.24	4.75	4.79	4.78	4.77	0.44	137.50	136.40	138.90	137.60	0.91	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	80.00	2.00	1.63	1.61	1.41	1.55	7.85	4.21	4.21	4.21	4.21	0.00	140.90	142.60	148.30	143.93	2.69	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	80.00	5.00	1.79	1.92	1.84	1.85	3.54	4.13	4.14	4.12	4.13	0.24	150.70	149.50	154.70	151.63	1.80	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	80.00	10.00	2.51	2.59	2.70	2.60	3.67	4.04	4.03	4.02	4.03	0.25	154.00	166.00	159.40	159.80	3.76	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 2.2. Muestras de 300 UNT

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 300 UNT					pH inicial 7.75					Conductividad inicial 49.00 µS/cm					Color inicial 25.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	75.00	0.10	77.23	78.30	75.24	76.92	2.02	7.09	7.06	7.03	7.06	0.42	48.30	47.20	46.20	47.23	2.22	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
2	75.00	0.50	67.76	69.24	68.19	68.40	1.11	7.08	7.05	7.11	7.08	0.42	49.30	48.70	50.10	49.37	1.42	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
3	75.00	1.00	65.20	64.87	63.92	64.66	1.03	7.00	7.03	7.06	7.03	0.43	48.30	50.40	51.20	49.97	3.00	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
4	75.00	2.00	64.41	66.18	65.23	65.27	1.36	7.04	7.10	7.07	7.07	0.42	49.30	47.60	46.20	47.70	3.25	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
5	75.00	5.00	69.20	66.32	71.14	68.89	3.52	7.09	7.12	7.05	7.09	0.50	47.50	50.40	49.50	49.13	3.02	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
6	75.00	10.00	72.90	74.38	73.63	73.64	1.00	7.07	7.02	7.10	7.06	0.57	51.50	49.30	50.70	50.50	2.21	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	60.00	0.10	3.96	3.59	3.92	3.82	5.31	6.23	6.06	6.26	6.18	1.74	82.20	84.50	85.50	84.07	2.01	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	60.00	0.50	2.06	2.25	2.43	2.25	8.24	5.42	5.76	5.74	5.64	3.38	100.50	103.60	109.40	104.50	4.32	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	60.00	1.00	1.98	2.22	1.86	2.02	9.07	4.66	4.86	4.81	4.78	2.18	110.40	109.30	107.50	109.07	1.34	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	60.00	2.00	1.68	1.79	1.63	1.70	4.81	4.19	4.24	4.24	4.22	0.68	119.50	117.60	118.50	118.53	0.80	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	60.00	5.00	2.10	1.91	1.80	1.94	7.84	4.12	4.16	4.19	4.16	0.84	122.60	123.90	121.40	122.63	1.02	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	60.00	10.00	3.02	2.84	2.98	2.95	3.21	4.05	4.08	4.09	4.07	0.51	130.60	131.70	132.90	131.73	0.87	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 2.3. Muestras de 100 UNT

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 100 UNT					pH inicial 7.24					Conductividad inicial 28.60 µS/cm					Color inicial 17.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	55.00	0.10	34.20	35.32	34.76	34.76	1.61	6.93	7.00	6.85	6.93	1.08	30.20	29.30	28.50	29.33	2.90	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
2	55.00	0.50	28.32	27.74	29.23	28.43	2.64	6.80	6.85	6.82	6.82	0.37	30.10	31.50	30.60	30.73	2.31	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
3	55.00	1.00	29.03	26.96	27.61	27.87	3.80	6.81	6.73	6.75	6.76	0.62	31.60	30.50	31.40	31.17	1.88	17.00	17.00	15.00	16.33	7.07
4	55.00	2.00	31.31	32.35	30.70	31.45	2.65	6.82	6.79	6.76	6.79	0.44	30.50	31.40	32.20	31.37	2.71	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
5	55.00	5.00	33.00	31.41	32.73	32.38	2.63	6.75	6.82	6.80	6.79	0.53	29.70	30.15	32.70	30.85	5.24	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
6	55.00	10.00	34.12	33.64	34.33	34.03	1.04	6.83	6.85	6.82	6.83	0.22	29.50	28.50	30.20	29.40	2.91	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	45.00	0.10	3.32	3.25	3.37	3.31	1.82	6.89	6.32	6.14	6.45	6.07	62.20	60.30	61.20	61.23	1.55	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	45.00	0.50	1.96	2.37	2.16	2.16	9.48	4.68	5.05	5.06	4.93	4.39	68.40	67.50	69.60	68.50	1.54	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	45.00	1.00	1.64	1.59	1.76	1.66	5.25	4.23	4.46	4.45	4.38	2.97	79.50	74.30	77.40	77.07	3.39	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	45.00	2.00	1.87	1.57	1.77	1.74	8.80	4.16	4.24	4.20	4.20	0.95	87.40	85.60	84.70	85.90	1.60	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	45.00	5.00	2.59	2.57	2.51	2.56	1.63	4.20	4.14	4.16	4.17	0.73	94.20	92.80	91.40	92.80	1.51	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	45.00	10.00	3.40	3.55	3.37	3.44	2.80	4.24	4.07	4.08	4.13	2.31	95.40	96.50	98.70	96.87	1.73	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 2.4. Muestras de 50 UNT

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 50 UNT					pH inicial 6.93					Conductividad inicial 22.80 µS/cm					Color inicial 13.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	45.00	0.10	24.20	23.15	24.26	23.87	2.62	6.68	6.70	6.72	6.70	0.30	19.60	18.50	18.30	18.80	3.72	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
2	45.00	0.50	22.21	24.12	23.31	23.21	4.13	6.71	6.69	6.70	6.70	0.15	21.30	19.60	18.80	19.90	6.42	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
3	45.00	1.00	22.17	23.20	23.65	23.01	3.30	6.63	6.60	6.67	6.63	0.53	22.10	21.40	19.60	21.03	6.13	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
4	45.00	2.00	21.10	22.41	23.75	22.42	5.91	6.73	6.68	6.71	6.71	0.38	24.50	25.10	24.80	24.80	1.21	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
5	45.00	5.00	22.83	22.12	23.70	22.88	3.46	6.72	6.69	6.65	6.69	0.53	24.60	23.70	24.10	24.13	1.87	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
6	45.00	10.00	27.10	26.60	28.30	27.33	3.20	6.78	6.73	6.80	6.77	0.53	23.10	24.00	22.50	23.20	3.25	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	35.00	0.10	1.66	1.59	1.53	1.59	4.08	5.94	5.93	5.85	5.91	0.84	47.80	45.10	46.50	46.47	2.91	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	35.00	0.50	1.58	1.53	1.44	1.52	4.68	4.86	4.67	4.85	4.79	2.23	44.60	45.20	46.30	45.37	1.90	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	35.00	1.00	1.43	1.38	1.41	1.41	1.79	4.41	4.42	4.48	4.44	0.85	59.60	60.20	61.30	60.37	1.43	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	35.00	2.00	2.02	1.82	1.77	1.87	7.07	4.25	4.26	4.24	4.25	0.24	64.50	65.00	66.40	65.30	1.51	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	35.00	5.00	1.67	1.74	1.98	1.80	9.05	4.14	4.15	4.18	4.16	0.50	67.20	64.70	66.80	66.23	2.03	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	35.00	10.00	1.84	2.04	2.18	2.02	8.46	4.09	4.08	4.12	4.10	0.51	79.30	78.10	78.60	78.67	0.77	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 2.5. Muestras de 20 UNT

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 20 UNT					pH inicial 6.70					Conductividad inicial 12.37 µS/cm					Color inicial 8.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	30.00	0.10	10.35	10.27	10.72	10.45	2.30	6.62	6.59	6.60	6.60	0.23	14.20	13.20	13.90	13.77	3.73	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
2	30.00	0.50	10.12	10.95	10.56	10.54	3.94	6.53	6.57	6.60	6.57	0.53	15.30	14.80	15.30	15.13	1.91	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
3	30.00	1.00	9.58	9.94	10.02	9.85	2.38	6.47	6.55	6.44	6.49	0.88	18.20	17.90	18.50	18.20	1.65	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
4	30.00	2.00	8.50	9.30	9.61	9.14	6.27	6.46	6.50	6.52	6.49	0.47	18.60	17.50	19.20	18.43	4.68	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
5	30.00	5.00	10.54	11.45	10.27	10.75	5.75	6.49	6.56	6.51	6.52	0.55	19.20	18.60	20.10	19.30	3.91	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
6	30.00	10.00	10.36	11.43	12.12	11.30	7.85	6.50	6.48	6.40	6.46	0.82	20.30	19.40	18.00	19.23	6.03	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	25.00	0.10	2.66	2.89	3.19	2.91	9.12	6.01	5.95	5.90	5.95	0.93	24.60	25.20	27.70	25.83	6.36	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	25.00	0.50	1.57	1.48	1.35	1.47	7.54	4.78	4.74	4.82	4.78	0.84	30.90	28.50	26.40	28.60	7.87	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	25.00	1.00	1.19	1.30	1.37	1.29	7.05	4.50	4.58	4.54	4.54	0.88	38.60	42.20	40.90	40.57	4.49	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	25.00	2.00	1.39	1.30	1.42	1.37	4.56	4.31	4.32	4.33	4.32	0.23	53.70	54.10	55.60	54.47	1.84	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	25.00	5.00	1.95	2.15	1.76	1.95	9.98	4.24	4.25	4.25	4.25	0.14	57.30	60.30	58.50	58.70	2.57	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	25.00	10.00	2.52	2.32	2.51	2.45	4.60	4.16	4.17	4.16	4.16	0.14	64.00	63.00	62.10	63.03	1.51	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 3. Resultados pH óptimo del coagulante natural y coagulante químico

Anexo 3.1. Muestras de 500 UNT

A. pH 5

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 500 UNT					pH inicial 5.00					Conductividad inicial 82.70 μ S/cm					Color inicial 39.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μ S/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	70.00	0.50	96.78	97.47	100.14	98.13	1.81	5.01	5.05	4.99	5.02	0.61	82.20	82.00	81.80	82.00	0.24	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
2	75.00	0.50	94.79	93.65	92.90	93.78	1.01	4.99	4.96	5.00	4.98	0.42	82.78	83.30	82.80	82.96	0.36	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
3	80.00	0.50	93.86	96.90	98.33	96.36	2.37	4.95	4.99	4.97	4.97	0.40	82.70	83.70	84.50	83.63	1.08	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
4	85.00	0.50	90.34	91.31	89.56	90.40	0.97	4.93	4.96	4.98	4.96	0.51	82.60	84.30	83.50	83.47	1.02	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
5	90.00	0.50	88.82	89.90	90.12	89.61	0.78	4.85	4.97	4.93	4.92	1.24	84.40	83.90	84.60	84.30	0.43	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
6	95.00	0.50	90.46	91.54	92.68	91.56	1.21	4.94	4.98	4.90	4.94	0.81	85.50	84.30	83.80	84.53	1.03	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μ S/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	70.00	2.00	3.97	4.69	4.29	4.32	8.36	4.17	4.13	4.40	4.23	3.44	130.40	128.60	142.20	133.73	5.52	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	75.00	2.00	2.85	3.18	2.78	2.94	7.27	4.09	4.09	4.26	4.15	2.37	136.70	134.30	150.10	140.37	6.07	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	80.00	2.00	2.71	2.96	2.66	2.78	5.79	4.04	4.06	4.27	4.12	3.09	138.70	139.70	159.20	145.87	7.92	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	85.00	2.00	2.50	2.65	2.71	2.62	4.13	4.13	4.08	4.20	4.14	1.46	146.60	147.30	162.80	152.23	6.02	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	90.00	2.00	3.20	2.87	2.78	2.95	7.50	4.03	4.10	4.18	4.10	1.83	152.30	153.20	171.20	158.90	6.71	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	95.00	2.00	2.51	2.76	2.96	2.74	8.22	3.98	4.01	4.12	4.04	1.83	167.40	165.70	170.20	167.77	1.35	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

B. pH 7

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 500 UNT					pH inicial 7.00					Conductividad inicial 60.40 µS/cm					Color inicial 39.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	70.00	0.50	100.62	97.31	99.80	99.24	1.74	7.00	7.05	7.03	7.03	0.36	59.90	60.70	62.00	60.87	1.74	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00
2	75.00	0.50	91.60	91.28	89.03	90.64	1.55	6.90	7.02	7.00	6.97	0.92	61.80	63.10	61.20	62.03	1.57	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00
3	80.00	0.50	84.56	87.27	86.00	85.94	1.58	6.94	6.98	6.89	6.94	0.65	63.20	64.00	61.70	62.97	1.85	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00
4	85.00	0.50	82.32	80.42	79.50	80.75	1.78	6.89	6.81	7.03	6.91	1.61	61.30	62.40	62.80	62.17	1.25	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00
5	90.00	0.50	87.79	88.26	86.88	87.64	0.80	6.94	6.84	6.92	6.90	0.77	63.10	62.70	62.30	62.70	0.64	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00
6	95.00	0.50	88.63	85.15	90.23	88.00	2.95	6.93	6.90	6.94	6.92	0.30	63.20	63.90	62.30	63.13	1.27	20.00	20.00	20.00	20.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	70.00	2.00	1.31	1.29	1.27	1.29	1.55	5.06	4.96	4.74	4.92	3.33	116.40	119.60	117.50	117.83	1.38	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	75.00	2.00	1.27	1.21	1.24	1.24	2.42	4.82	4.90	4.86	4.86	0.82	125.60	124.40	127.20	125.73	1.12	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	80.00	2.00	1.25	1.18	1.23	1.22	2.96	4.76	4.89	4.80	4.82	1.38	131.40	134.60	135.90	133.97	1.73	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	85.00	2.00	1.16	1.14	1.10	1.13	2.70	4.80	4.93	4.83	4.85	1.40	137.50	138.70	141.60	139.27	1.51	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	90.00	2.00	1.23	1.43	1.38	1.35	7.73	4.65	4.72	4.69	4.69	0.75	145.70	148.50	149.70	147.97	1.39	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	95.00	2.00	1.35	1.40	1.28	1.34	4.49	4.74	4.62	4.70	4.69	1.30	156.30	155.60	158.40	156.77	0.93	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

C. pH 9

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 500 UNT					pH inicial 9.00					Conductividad inicial 76.60 $\mu\text{S/cm}$					Color inicial 39.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	70.00	0.50	78.54	82.26	81.48	80.76	2.43	9.02	9.05	8.97	9.01	0.45	70.40	69.70	68.40	69.5	1.46	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
2	75.00	0.50	75.18	74.42	75.49	75.03	0.73	8.89	8.97	8.93	8.93	0.45	70.80	69.70	68.80	69.8	1.44	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
3	80.00	0.50	71.35	69.91	70.63	70.63	1.02	8.95	8.98	8.83	8.92	0.87	70.80	71.40	72.50	71.6	1.20	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
4	85.00	0.50	76.58	77.31	77.60	77.16	0.68	8.80	8.94	8.96	8.90	0.98	71.30	72.00	71.80	71.7	0.50	20.00	17.00	17.00	18.00	9.62
5	90.00	0.50	74.00	75.89	77.32	75.74	2.20	8.98	8.87	8.88	8.91	0.68	72.40	70.60	72.30	71.8	1.41	20.00	20.00	17.00	19.00	9.12
6	95.00	0.50	78.64	79.49	75.14	77.76	2.97	8.90	8.73	8.86	8.83	1.01	73.00	72.50	71.70	72.4	0.91	20.00	17.00	20.00	19.00	9.12
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	70.00	2.00	2.76	2.74	2.70	2.73	1.12	5.13	5.19	5.14	5.15	0.62	125.30	120.60	121.50	122.5	2.04	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	75.00	2.00	2.62	2.68	2.70	2.67	1.56	4.89	4.97	4.88	4.91	1.00	134.00	132.50	129.50	132.0	1.74	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	80.00	2.00	2.00	2.12	2.18	2.10	4.36	4.72	4.75	4.80	4.76	0.85	142.00	138.60	136.60	139.1	1.96	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	85.00	2.00	1.98	2.08	1.85	1.97	5.85	4.93	4.82	4.76	4.84	1.78	150.30	149.50	147.60	149.1	0.93	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	90.00	2.00	2.58	2.55	2.50	2.54	1.59	4.67	4.73	4.82	4.74	1.59	159.30	158.30	156.30	158.0	0.97	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	95.00	2.00	2.63	2.60	2.57	2.60	1.15	4.57	4.61	4.68	4.62	1.21	157.00	160.50	166.00	161.2	2.82	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 3.2. Muestras de 300 UNT

A. pH 5

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 300 UNT					pH inicial 5.00					Conductividad inicial 60.50 µS/cm					Color inicial 25.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	60.00	1.00	85.12	87.34	84.18	85.55	1.90	4.90	4.97	4.98	4.95	0.88	59.80	59.40	60.20	59.80	0.67	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
2	65.00	1.00	80.97	84.21	85.23	83.47	2.66	4.98	4.95	4.92	4.94	0.43	59.70	60.30	61.40	60.47	1.43	23.00	23.00	23.00	23.00	0.00
3	70.00	1.00	83.43	81.80	81.21	82.15	1.40	4.97	4.93	4.90	4.93	0.71	60.30	61.20	61.60	61.03	1.09	23.00	23.00	20.00	22.00	7.87
4	75.00	1.00	79.89	79.00	81.53	80.14	1.60	4.87	4.89	4.90	4.89	0.31	61.50	60.70	63.30	61.83	2.15	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
5	80.00	1.00	81.78	82.34	78.82	80.98	2.34	4.90	4.87	4.94	4.90	0.72	60.70	61.60	62.40	61.57	1.38	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
6	85.00	1.00	80.48	84.21	85.02	83.24	2.91	4.90	4.87	4.85	4.87	0.52	61.80	62.70	62.20	62.23	0.72	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	45.00	2.00	2.85	2.88	2.83	2.85	0.88	4.59	4.50	4.55	4.55	0.99	99.10	96.40	107.20	100.90	5.57	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	50.00	2.00	2.82	2.77	2.80	2.80	0.90	4.48	4.48	4.50	4.49	0.26	114.40	107.30	112.20	111.30	3.27	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	55.00	2.00	2.69	2.70	2.78	2.72	1.81	4.48	4.47	4.46	4.47	0.22	125.30	114.00	113.20	117.50	5.76	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	60.00	2.00	2.73	2.59	2.68	2.67	2.66	4.44	4.45	4.47	4.45	0.34	123.50	127.70	117.30	122.83	4.26	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	65.00	2.00	2.78	2.75	2.81	2.78	1.08	4.40	4.41	4.43	4.41	0.35	127.70	126.30	125.30	126.43	0.95	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	70.00	2.00	2.80	2.79	2.82	2.80	0.54	4.39	4.43	4.39	4.40	0.52	132.50	137.60	139.60	136.57	2.68	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

B. pH 7

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 300 UNT					pH inicial 7.00					Conductividad inicial 47.20 $\mu\text{S/cm}$					Color inicial 25.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	60.00	1.00	80.62	79.31	77.80	79.24	1.78	7.02	6.98	7.00	7.00	0.29	48.80	48.30	47.40	48.17	1.47	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
2	65.00	1.00	74.79	75.26	74.88	74.98	0.33	6.94	6.85	6.96	6.92	0.85	48.30	48.80	47.70	48.27	1.14	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
3	70.00	1.00	74.56	77.27	76.00	75.94	1.79	6.89	6.84	6.95	6.89	0.80	47.70	49.10	50.30	49.03	2.65	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
4	75.00	1.00	72.32	70.42	69.50	70.75	2.03	6.90	6.96	6.87	6.91	0.66	48.90	46.80	49.20	48.30	2.71	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
5	80.00	1.00	71.60	74.28	72.03	72.64	1.98	6.85	6.81	6.93	6.86	0.89	49.10	49.70	50.60	49.80	1.52	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
6	85.00	1.00	76.63	73.15	78.23	76.00	3.42	6.88	6.83	6.80	6.84	0.59	50.40	50.50	50.00	50.30	0.53	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	45.00	2.00	2.32	2.27	2.19	2.26	2.90	4.99	5.03	4.97	5.00	0.61	90.50	92.30	89.10	90.6	1.77	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	50.00	2.00	1.66	1.60	1.53	1.60	4.07	5.01	5.14	5.05	5.07	1.31	101.20	96.40	98.40	98.7	2.44	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	55.00	2.00	0.66	0.56	0.60	0.61	8.30	4.85	4.82	4.95	4.87	1.40	106.30	109.50	112.20	109.3	2.70	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	60.00	2.00	0.73	0.70	0.69	0.71	2.95	4.70	4.91	4.84	4.82	2.22	115.50	116.40	119.60	117.2	1.84	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	65.00	2.00	0.77	0.72	0.67	0.72	6.94	4.79	4.82	4.96	4.86	1.87	121.80	119.60	117.70	119.7	1.71	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	70.00	2.00	0.73	0.70	0.78	0.74	5.49	4.78	4.70	4.81	4.76	1.19	129.40	127.80	126.40	127.9	1.17	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

C. pH 9

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 300 UNT					pH inicial 9.00					Conductividad inicial 55.10 µS/cm					Color inicial 25.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	60.00	1.00	69.68	72.23	73.61	71.84	2.78	8.90	8.93	8.86	8.90	0.39	48.50	49.10	50.70	49.4	2.30	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
2	65.00	1.00	68.31	67.00	68.42	67.91	1.16	8.91	8.97	8.80	8.89	0.97	49.70	50.40	51.80	50.6	2.11	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
3	70.00	1.00	62.94	64.15	65.78	64.29	2.22	8.90	8.93	8.85	8.89	0.45	53.80	50.10	52.50	52.1	3.60	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
4	75.00	1.00	64.92	66.70	65.03	65.55	1.52	8.85	8.96	8.78	8.86	1.02	50.40	51.20	52.30	51.3	1.86	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
5	80.00	1.00	69.21	71.43	70.96	70.53	1.66	8.80	8.84	8.98	8.87	1.07	52.60	51.30	50.60	51.5	1.97	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
6	85.00	1.00	72.82	70.04	71.95	71.60	1.99	8.79	8.81	8.94	8.85	0.92	51.00	53.70	52.80	52.5	2.62	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	45.00	2.00	6.24	6.32	5.53	6.03	7.21	5.60	5.49	5.37	5.49	2.10	94.50	90.20	89.30	91.3	3.04	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	50.00	2.00	4.09	3.94	3.82	3.95	3.42	5.39	5.38	5.30	5.36	0.92	100.40	99.60	101.20	100.4	0.80	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	55.00	2.00	3.92	3.59	3.78	3.76	4.40	5.23	5.19	5.20	5.21	0.40	110.30	109.50	107.40	109.1	1.37	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	60.00	2.00	3.35	3.18	3.28	3.27	2.61	5.25	5.18	5.32	5.25	1.33	119.70	118.30	117.20	118.4	1.06	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	65.00	2.00	3.18	3.49	3.23	3.30	5.04	5.20	5.18	5.25	5.21	0.69	125.40	128.50	130.20	128.0	1.90	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	70.00	2.00	3.15	3.36	3.01	3.17	5.55	5.38	5.27	5.19	5.28	1.81	132.00	132.50	130.20	131.6	0.92	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 3.3. Muestras de 100 UNT

A. pH 5

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 100 UNT					pH inicial 5.00					Conductividad inicial 39.10 μ S/cm					Color inicial 17.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μ S/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	40.00	1.00	42.14	40.98	41.15	41.42	1.51	4.91	4.89	4.92	4.91	0.31	38.50	39.00	40.00	39.17	1.95	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
2	45.00	1.00	39.65	40.89	38.27	39.60	3.31	4.92	4.90	4.88	4.90	0.41	38.80	39.40	39.10	39.10	0.77	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
3	50.00	1.00	36.43	35.65	37.71	36.60	2.84	4.92	4.87	4.89	4.89	0.51	41.80	40.60	39.30	40.57	3.08	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
4	55.00	1.00	38.10	40.67	41.25	40.01	4.19	4.90	4.89	4.85	4.88	0.54	37.80	39.70	41.20	39.57	4.31	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
5	60.00	1.00	40.67	42.15	41.76	41.53	1.85	4.89	4.88	4.84	4.87	0.54	40.63	39.70	42.10	40.81	2.97	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
6	65.00	1.00	42.67	40.15	41.76	41.53	3.07	4.92	4.87	4.83	4.87	0.93	40.70	40.50	41.60	40.93	1.43	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μ S/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	35.00	1.00	2.91	2.87	2.85	2.88	1.06	4.61	4.47	4.59	4.56	1.66	82.80	87.20	79.70	83.23	4.53	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	40.00	1.00	2.89	2.84	2.86	2.86	0.88	4.50	4.40	4.54	4.48	1.61	91.90	94.10	86.90	90.97	4.06	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	45.00	1.00	2.81	2.80	2.77	2.79	0.75	4.47	4.40	4.54	4.47	1.57	97.50	96.10	91.10	94.90	3.55	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	50.00	1.00	2.83	2.89	2.90	2.87	1.31	4.44	4.45	4.50	4.46	0.72	104.70	101.30	95.70	100.57	4.52	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	55.00	1.00	2.92	2.96	3.01	2.96	1.52	4.46	4.40	4.49	4.45	1.03	110.00	114.60	102.70	109.10	5.50	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	60.00	1.00	3.02	3.10	2.97	3.03	2.16	4.42	4.42	4.41	4.42	0.13	118.80	119.20	113.00	117.00	2.97	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

B. pH 7

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 100 UNT					pH inicial 7.00					Conductividad inicial 28.40 µS/cm					Color inicial 17.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	40.00	1.00	34.46	35.92	34.55	34.98	2.34	6.84	6.97	6.93	6.92	0.96	28.00	28.50	27.30	27.93	2.16	15.00	15.00	15.00	15.00	0.00
2	45.00	1.00	34.48	35.42	33.80	34.57	2.35	6.85	6.92	6.94	6.90	0.68	29.20	27.80	27.40	28.13	3.36	15.00	15.00	15.00	15.00	0.00
3	50.00	1.00	34.90	33.71	32.73	33.78	3.22	6.89	6.75	6.90	6.85	1.22	30.00	28.80	28.30	29.03	3.01	15.00	15.00	15.00	15.00	0.00
4	55.00	1.00	32.26	31.17	34.18	32.54	4.68	6.93	6.77	6.81	6.84	1.22	27.60	27.20	29.80	28.20	4.96	15.00	15.00	15.00	15.00	0.00
5	60.00	1.00	32.12	31.43	30.61	31.39	2.41	6.77	6.79	6.84	6.80	0.53	30.00	28.60	29.90	29.50	2.65	15.00	15.00	15.00	15.00	0.00
6	65.00	1.00	33.28	34.76	35.45	34.50	3.21	6.75	6.83	6.86	6.81	0.83	30.40	30.90	30.10	30.47	1.33	15.00	15.00	15.00	15.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	35.00	1.00	1.60	1.63	1.59	1.61	1.30	5.20	5.17	5.19	5.19	0.29	66.30	69.50	68.60	68.13	2.42	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	40.00	1.00	1.50	1.48	1.52	1.50	1.33	4.80	4.92	5.01	4.91	2.15	75.40	76.30	77.20	76.30	1.18	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	45.00	1.00	1.43	1.26	1.36	1.35	6.33	5.11	5.32	4.99	5.14	3.25	83.50	81.90	85.10	83.50	1.92	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	50.00	1.00	1.47	1.56	1.50	1.51	3.03	4.83	4.80	4.92	4.85	1.29	91.40	93.20	90.60	91.73	1.45	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	55.00	1.00	1.58	1.66	1.47	1.57	6.08	4.94	4.78	4.73	4.82	2.28	98.50	103.30	97.20	99.67	3.22	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	60.00	1.00	1.56	1.60	1.65	1.60	2.81	4.80	4.98	5.03	4.94	2.45	102.40	99.60	101.20	101.07	1.39	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

C. pH 9

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 100 UNT					pH inicial 9.00					Conductividad inicial 32.20 µS/cm					Color inicial 17.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	40.00	1.00	30.86	31.83	32.37	31.69	2.41	8.87	8.94	8.96	8.92	0.53	29.60	28.40	29.50	29.17	2.28	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
2	45.00	1.00	29.92	28.84	31.25	30.00	4.02	8.85	8.92	8.84	8.87	0.49	28.40	29.50	30.10	29.33	2.94	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
3	50.00	1.00	27.42	26.46	26.29	26.72	2.28	8.90	8.85	8.82	8.86	0.46	32.60	31.80	30.40	31.60	3.52	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
4	55.00	1.00	28.95	29.54	29.27	29.25	1.01	8.86	8.79	8.91	8.85	0.68	30.50	29.60	28.50	29.53	3.39	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
5	60.00	1.00	31.13	29.88	30.30	30.44	2.09	8.82	8.90	8.87	8.86	0.46	30.80	29.60	31.60	30.67	3.28	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
6	65.00	1.00	31.75	31.09	32.58	31.81	2.35	8.80	8.86	8.83	8.83	0.34	31.40	30.50	32.10	31.33	2.56	17.00	17.00	17.00	17.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	35.00	1.00	4.93	4.64	4.88	4.82	3.22	5.90	5.89	5.73	5.84	1.63	72.50	70.80	69.10	70.80	2.40	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	40.00	1.00	4.37	4.40	4.50	4.42	1.54	5.62	5.78	5.90	5.77	2.44	84.60	80.20	81.60	82.13	2.74	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	45.00	1.00	4.69	4.91	4.70	4.77	2.61	5.73	5.80	5.70	5.74	0.89	90.40	89.20	88.10	89.23	1.29	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	50.00	1.00	4.54	4.70	4.37	4.54	3.64	5.65	5.69	5.74	5.69	0.79	99.30	97.50	96.30	97.70	1.55	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	55.00	1.00	4.57	4.80	4.59	4.65	2.74	5.56	5.47	5.55	5.53	0.89	100.30	100.20	110.00	103.50	5.44	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	60.00	1.00	4.69	4.57	4.87	4.71	3.21	5.49	5.46	5.42	5.46	0.64	110.50	112.40	115.80	112.90	2.38	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 3.4. Muestras de 50 UNT

A. pH 5

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 50 UNT					pH inicial 5.00					Conductividad inicial 28.40 μ S/cm					Color inicial 13.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μ S/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	35.00	2.00	32.90	31.22	33.80	32.64	4.01	4.84	4.87	4.90	4.87	0.62	29.60	29.90	30.60	30.03	1.71	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
2	40.00	2.00	30.46	29.76	28.57	29.60	3.23	4.91	4.82	4.84	4.86	0.97	31.70	30.40	29.20	30.43	4.11	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
3	45.00	2.00	32.50	31.80	30.84	31.71	2.63	4.82	4.85	4.80	4.82	0.52	29.20	31.90	30.30	30.47	4.46	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
4	50.00	2.00	33.45	32.29	32.10	32.61	2.24	4.78	4.80	4.77	4.78	0.32	28.80	30.70	31.80	30.43	4.99	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
5	55.00	2.00	33.53	32.64	33.16	33.11	1.35	4.75	4.79	4.77	4.77	0.42	30.90	31.70	29.60	30.73	3.45	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
6	60.00	2.00	34.42	35.28	32.87	34.19	3.57	4.80	4.83	4.87	4.83	0.73	31.40	31.80	30.30	31.17	2.49	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (μ S/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	20.00	1.00	2.51	2.69	2.73	2.64	4.43	5.00	4.82	4.64	4.82	3.73	57.20	64.20	57.80	59.73	6.50	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	25.00	1.00	2.06	2.05	2.09	2.07	1.01	4.93	4.73	4.56	4.74	3.91	64.70	69.40	64.50	66.20	4.19	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	30.00	1.00	1.90	1.88	1.95	1.91	1.89	4.84	4.72	4.55	4.70	3.10	69.50	73.00	72.90	71.80	2.78	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	35.00	1.00	2.10	2.06	2.09	2.08	1.00	4.76	4.58	4.51	4.62	2.79	77.40	85.80	80.50	81.23	5.23	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	40.00	1.00	2.07	2.08	2.11	2.09	1.00	4.71	4.54	4.45	4.57	2.89	83.20	93.30	84.30	86.93	6.37	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	45.00	1.00	2.10	2.14	2.17	2.14	1.64	4.60	4.46	4.41	4.49	2.19	90.90	101.80	97.50	96.73	5.68	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

B. pH 7

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 50 UNT					pH inicial 7.00					Conductividad inicial 21.70 µS/cm					Color inicial 13.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	35.00	2.00	30.86	31.21	31.79	31.29	1.50	6.80	6.88	6.86	6.85	0.61		21.00	20.50	21.27	4.37	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
2	40.00	2.00	26.98	26.08	27.76	26.94	3.12	6.94	6.89	6.83	6.89	0.80	19.90	21.10	22.20	21.07	5.46	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
3	45.00	2.00	26.34	25.85	24.47	25.55	3.79	6.93	6.90	6.85	6.89	0.59	21.50	23.20	20.60	21.77	6.07	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
4	50.00	2.00	28.82	27.90	29.56	28.76	2.89	6.86	6.77	6.89	6.84	0.91	20.00	23.10	23.70	22.27	8.92	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
5	55.00	2.00	29.79	31.61	30.03	30.48	3.24	6.84	6.80	6.92	6.85	0.89	24.30	23.00	22.90	23.40	3.34	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
6	60.00	2.00	33.73	32.78	34.56	33.69	2.64	6.74	6.78	6.83	6.78	0.66	20.70	24.20	21.80	22.23	8.05	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	20.00	1.00	1.76	1.83	1.61	1.73	6.48	5.67	5.45	5.54	5.55	1.99	47.60	44.90	46.00	46.17	2.94	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	25.00	1.00	1.55	1.47	1.40	1.47	5.09	5.56	5.47	5.43	5.49	1.21	48.90	48.60	49.90	49.13	1.39	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	30.00	1.00	1.34	1.29	1.27	1.30	2.77	5.60	5.36	5.47	5.48	2.19	51.60	50.30	52.10	51.33	1.81	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	35.00	1.00	1.36	1.39	1.42	1.39	2.16	5.24	5.62	5.31	5.39	3.75	54.40	53.10	60.30	55.93	6.86	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	40.00	1.00	1.43	1.47	1.52	1.47	3.06	5.33	5.26	5.35	5.31	0.89	62.30	64.60	55.90	60.93	7.40	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	45.00	1.00	1.62	1.62	1.59	1.61	1.08	5.34	5.21	5.11	5.22	2.21	67.40	63.90	65.60	65.63	2.67	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

C. pH 9

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 50 UNT					pH inicial 9.00					Conductividad inicial 25.30 µS/cm					Color inicial 13.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	35.00	2.00	25.98	24.51	25.69	25.39	3.07	8.90	8.86	8.83	8.86	0.40	22.60	20.70	21.90	21.73	4.42	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
2	40.00	2.00	23.31	24.18	25.62	24.37	4.79	8.85	8.82	8.91	8.86	0.52	21.60	22.50	23.40	22.50	4.00	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
3	45.00	2.00	20.13	22.15	18.81	20.36	8.26	8.80	8.85	8.89	8.85	0.51	23.90	24.10	22.70	23.57	3.21	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
4	50.00	2.00	21.67	22.83	23.47	22.66	4.03	8.86	8.82	8.84	8.84	0.21	22.30	23.40	24.10	23.27	3.90	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
5	55.00	2.00	23.69	24.31	25.82	24.61	4.45	8.80	8.75	8.77	8.77	0.29	24.70	23.30	22.20	23.40	5.35	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
6	60.00	2.00	26.75	25.51	24.90	25.72	3.67	8.74	8.80	8.79	8.78	0.37	24.30	22.80	23.90	23.67	3.28	13.00	13.00	13.00	13.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	20.00	1.00	4.20	3.95	4.32	4.16	4.54	6.19	6.25	6.34	6.26	1.21	47.50	48.60	49.20	48.43	1.78	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	25.00	1.00	4.04	3.97	4.15	4.05	2.24	5.89	5.92	6.00	5.94	0.96	54.60	53.80	52.10	53.50	2.39	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	30.00	1.00	3.64	3.51	3.54	3.56	1.91	6.11	6.12	5.90	6.04	2.06	60.40	64.00	63.20	62.53	3.02	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	35.00	1.00	4.17	4.01	4.32	4.17	3.72	5.87	5.78	5.84	5.83	0.79	74.60	70.30	72.60	72.50	2.97	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	40.00	1.00	3.75	3.66	3.50	3.64	3.48	5.73	5.79	5.92	5.81	1.67	84.30	80.70	79.40	81.47	3.12	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	45.00	1.00	3.97	4.07	3.80	3.95	3.46	5.80	5.92	6.00	5.91	1.70	90.40	89.20	88.30	89.30	1.18	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 3.5. Muestras de 20 UNT

A. pH 5

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 20 UNT					pH inicial 5.00					Conductividad inicial 20.60 µS/cm					Color inicial 8.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	20.00	2.00	16.69	15.53	16.66	16.29	4.06	4.78	4.83	4.85	4.82	0.75	20.20	20.40	19.90	20.17	1.25	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
2	25.00	2.00	15.54	16.48	15.35	15.79	3.83	4.80	4.77	4.76	4.78	0.44	19.80	20.50	20.40	20.23	1.87	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
3	30.00	2.00	13.62	12.45	12.70	12.92	4.77	4.72	4.79	4.75	4.75	0.74	18.50	23.80	22.20	21.50	12.64	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
4	35.00	2.00	12.80	14.80	13.33	13.64	7.59	4.79	4.77	4.73	4.76	0.64	23.30	21.50	20.90	21.90	5.70	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
5	40.00	2.00	14.75	15.83	14.20	14.93	5.56	4.70	4.72	4.78	4.73	0.88	20.40	22.20	23.60	22.07	7.27	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
6	45.00	2.00	14.33	13.70	14.77	14.27	3.77	4.71	4.68	4.73	4.71	0.53	21.70	22.30	23.40	22.47	3.84	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	10.00	1.00	2.52	2.60	2.40	2.51	4.02	4.93	5.00	4.83	4.92	1.74	35.90	34.10	31.70	33.90	6.22	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	15.00	1.00	2.92	2.86	2.87	2.88	1.11	4.63	4.77	4.77	4.72	1.71	43.50	41.60	42.20	42.43	2.29	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	20.00	1.00	1.80	1.78	1.82	1.80	1.11	4.54	4.70	4.75	4.66	2.35	49.90	47.10	48.80	48.60	2.90	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	25.00	1.00	1.85	1.90	1.87	1.87	1.34	4.58	4.51	4.71	4.60	2.21	53.60	57.50	55.30	55.47	3.53	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	30.00	1.00	2.97	2.48	2.51	2.65	9.35	4.56	4.53	4.59	4.56	0.66	66.20	64.10	62.50	64.27	2.89	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	35.00	1.00	2.90	3.07	2.69	2.89	6.59	4.50	4.51	4.56	4.52	0.71	74.00	79.90	77.70	77.20	3.86	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

B. pH 7

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 20 UNT					pH inicial 7.00					Conductividad inicial 13.00 $\mu\text{S/cm}$					Color inicial 8.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	20.00	2.00	14.64	15.78	14.62	15.01	4.42	6.89	6.93	6.83	6.88	0.73	13.30	12.10	12.50	12.63	4.84	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
2	25.00	2.00	13.40	15.21	14.79	14.47	6.55	6.90	6.86	6.74	6.83	1.22	13.80	12.70	14.20	13.57	5.73	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
3	30.00	2.00	10.24	10.67	11.43	10.78	5.59	6.79	6.74	6.77	6.77	0.37	13.20	12.60	13.70	13.17	4.18	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
4	35.00	2.00	11.31	10.75	12.00	11.35	5.51	6.73	6.75	6.70	6.73	0.37	15.00	13.70	13.40	14.03	6.06	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
5	40.00	2.00	13.45	12.86	12.75	13.02	2.89	6.70	6.81	6.75	6.75	0.82	14.00	12.70	13.30	13.33	4.88	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
6	45.00	2.00	14.57	15.30	13.63	14.50	5.77	6.67	6.76	6.69	6.71	0.70	15.90	15.00	14.30	15.07	5.32	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual ($\mu\text{S/cm}$)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	10.00	1.00	1.73	1.57	1.65	1.65	4.85	5.93	5.72	5.60	5.75	2.90	24.40	23.50	22.70	23.53	3.61	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	15.00	1.00	1.55	1.38	1.44	1.46	5.92	5.70	5.46	5.92	5.69	4.04	27.20	31.60	29.80	29.53	7.49	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	20.00	1.00	1.22	1.29	1.25	1.25	2.80	5.64	5.38	5.49	5.50	2.37	39.50	42.70	43.20	41.80	4.80	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	25.00	1.00	1.25	1.19	1.16	1.20	3.82	5.40	5.20	5.78	5.46	5.40	49.20	52.70	47.90	49.93	4.97	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	30.00	1.00	1.37	1.34	1.30	1.34	2.63	5.38	5.51	5.40	5.43	1.29	56.30	57.60	55.70	56.53	1.72	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	35.00	1.00	1.42	1.45	1.47	1.45	1.74	5.28	5.27	5.38	5.31	1.15	65.40	64.30	66.50	65.40	1.68	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

C. pH 9

VALORES INICIALES			Turbidez inicial 20 UNT					pH inicial 9.00					Conductividad inicial 17.80 µS/cm					Color inicial 8.00 UCV				
COAGULANTE NATURAL			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	20.00	2.00	11.83	10.00	10.95	10.93	8.38	8.77	8.79	8.86	8.81	0.54	19.50	18.80	17.90	18.73	4.28	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
2	25.00	2.00	9.00	10.35	8.57	9.31	9.98	8.72	8.80	8.84	8.79	0.70	18.40	19.20	20.50	19.37	5.47	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
3	30.00	2.00	8.45	8.56	8.04	8.35	3.28	8.67	8.86	8.71	8.79	1.21	18.40	19.60	20.20	19.40	4.72	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
4	35.00	2.00	9.67	10.25	8.32	9.41	10.52	8.78	8.72	8.80	8.76	0.65	17.80	19.40	18.60	18.60	4.30	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
5	40.00	2.00	8.78	9.66	8.12	8.85	8.73	8.82	8.75	8.77	8.78	0.41	20.00	19.40	18.70	19.37	3.36	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
6	45.00	2.00	10.25	10.00	9.80	10.02	2.25	8.69	8.75	8.70	8.71	0.37	20.40	19.60	20.20	20.07	2.07	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00
COAGULANTE QUÍMICO			Turbidez residual (UNT)					pH residual					Conductividad residual (µS/cm)					Color residual (UCV)				
N° jarra	Dosis (mg/L)	CC (%)	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV	R1	R2	R3	\bar{x}	CV
1	10.00	1.00	3.70	3.64	3.58	3.64	1.65	6.78	6.50	6.63	6.64	2.11	25.60	27.30	28.20	27.03	4.88	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
2	15.00	1.00	3.63	3.74	3.94	3.77	4.17	6.45	6.38	6.52	6.45	1.09	34.40	35.70	36.70	35.60	3.24	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
3	20.00	1.00	3.29	3.53	3.49	3.44	3.74	6.21	6.65	6.45	6.55	2.16	46.00	43.20	40.60	43.27	6.24	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
4	25.00	1.00	3.20	3.12	3.16	3.16	1.27	6.34	6.32	6.21	6.27	1.24	51.50	50.20	53.20	51.63	2.91	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
5	30.00	1.00	3.81	3.67	3.65	3.71	2.35	6.53	6.25	6.47	6.42	2.30	60.70	59.30	58.40	59.47	1.95	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00
6	35.00	1.00	3.84	4.01	3.72	3.86	3.78	6.23	6.14	6.28	6.22	1.14	68.60	67.20	69.30	68.37	1.56	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00

Anexo 4. Resultados de Análisis Estadístico

Anexo 4.1. Dosis óptima del coagulante natural

A. Prueba de homogeneidad de varianzas

Nivel de turbidez	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
20 UNT	0,278	5	12	0,916
50 UNT	0,739	5	12	0,609
100 UNT	0,740	5	12	0,608
300 UNT	1,744	5	12	0,199
500 UNT	1,127	5	12	0,397

B. Prueba de ANOVA

Nivel de turbidez	Detalle	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
20 UNT	Entre grupos	99,220	5	19,844	36,453	0,000
	Dentro de grupos	6,532	12	0,544		
	Total	105,753	17			
50 UNT	Entre grupos	108,420	5	21,684	29,961	0,000
	Dentro de grupos	8,685	12	0,724		
	Total	117,104	17			
100 UNT	Entre grupos	219,191	5	43,838	29,486	0,000
	Dentro de grupos	17,841	12	1,487		
	Total	237,032	17			
300 UNT	Entre grupos	809,067	5	161,813	22,872	0,000
	Dentro de grupos	84,897	12	7,075		
	Total	893,964	17			
500 UNT	Entre grupos	494,972	5	98,994	23,583	0,000
	Dentro de grupos	50,372	12	4,198		
	Total	545,343	17			

C. Prueba de Dunnet

Variable dependiente (Nivel de turbidez)	(I) Dosis coagulante natural (mg/L)	(J) Dosis óptima coagulante natural (mg/L)	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
20 UNT	20	30	7,50000*	0,60242	0,000	5,7522	9,2478
	25	30	2,24000*	0,60242	0,012	0,4922	3,9878
	35	30	1,50000	0,60242	0,102	-0,2478	3,2478
	40	30	3,27667*	0,60242	0,001	1,5289	5,0244
	45	30	3,98000*	0,60242	0,000	2,2322	5,7278
50 UNT	35	45	6,34000*	0,69461	0,000	4,3247	8,3553
	40	45	3,11000*	0,69461	0,003	1,0947	5,1253
	50	45	1,63333	0,69461	0,128	-0,3819	3,6486
	55	45	4,08333*	0,69461	0,000	2,0681	6,0986
	60	45	6,97333*	0,69461	0,000	4,9581	8,9886
100 UNT	40	55	10,07000*	0,99557	0,000	7,1816	12,9584
	45	55	7,34333*	0,99557	0,000	4,4549	10,2317
	50	55	3,57333*	0,99557	0,015	0,6849	6,4617
	60	55	6,69000*	0,99557	0,000	3,8016	9,5784
	65	55	9,54667*	0,99557	0,000	6,6583	12,4351
300 UNT	60	75	22,25333*	2,17175	0,000	15,9525	28,5542
	65	75	9,35000*	2,17175	0,004	3,0492	15,6508
	70	75	8,19667*	2,17175	0,011	1,8958	14,4975
	80	75	8,17667*	2,17175	0,011	1,8758	14,4775
	85	75	13,60000*	2,17175	0,000	7,2992	19,9008
500 UNT	70	90	16,86667*	1,67285	0,000	12,0133	21,7200
	75	90	12,61333*	1,67285	0,000	7,7600	17,4667
	80	90	8,53333*	1,67285	0,001	3,6800	13,3867
	85	90	6,25000*	1,67285	0,011	1,3966	11,1034
	95	90	7,56667*	1,67285	0,003	2,7133	12,4200

Anexo 4.2. Concentración óptima del coagulante natural y químico

A. Prueba de homogeneidad de varianzas

Nivel de turbidez	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
20 UNT	1,507	5	12	0,259
50 UNT	0,849	5	12	0,541
100 UNT	0,660	5	12	0,660
300 UNT	1,668	5	12	0,217
500 UNT	2,807	5	12	0,066

B. Prueba de ANOVA

Nivel de turbidez	Detalle	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
20 UNT	Entre grupos	8,529	5	1,706	5,744	0,006
	Dentro de grupos	3,563	12	0,297		
	Total	12,092	17			
50 UNT	Entre grupos	76,073	5	15,215	14,956	0,000
	Dentro de grupos	12,207	12	1,017		
	Total	88,280	17			
100 UNT	Entre grupos	149,391	5	29,878	64,163	0,000
	Dentro de grupos	5,588	12	0,466		
	Total	154,979	17			
300 UNT	Entre grupos	344,904	5	68,981	38,874	0,000
	Dentro de grupos	21,293	12	1,774		
	Total	366,198	17			
500 UNT	Entre grupos	285,744	5	57,149	13,507	0,000
	Dentro de grupos	50,744	12	4,231		
	Total	336,517	17			

C. Prueba de Dunnet

Variable dependiente (Nivel de turbidez)	(I) Concentración del coagulante natural (%)	(J) Concentración óptima del coagulante natural (%)	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
20 UNT	0,1	2	1,31000*	0,44493	0,046	0,0191	2,6009
	0,5	2	1,40667*	0,44493	0,032	0,1158	2,6975
	1	2	0,71000	0,44493	0,405	-0,5809	2,0009
	5	2	1,61667*	0,44493	0,014	0,3258	2,9075
	10	2	2,16667*	0,44493	0,002	0,8758	3,4575
50 UNT	0,1	2	3,50667*	0,82352	0,005	1,1174	5,8959
	0,5	2	2,85000*	0,82352	0,019	0,4608	5,2392
	1	2	2,64333*	0,82352	0,029	0,2541	5,0326
	5	2	2,52000*	0,82352	0,038	0,1308	4,9092
	10	2	6,97000*	0,82352	0,000	4,5808	9,3592
100 UNT	0,1	1	8,03667*	0,55717	0,000	6,4202	9,6532
	0,5	1	1,70667*	0,55717	0,038	0,0902	3,3232
	2	1	4,73000*	0,55717	0,000	3,1135	6,3465
	5	1	5,65667*	0,55717	0,000	4,0402	7,2732
	10	1	7,30667*	0,55717	0,000	5,6902	8,9232
300 UNT	0,1	1	12,26000*	1,08764	0,000	9,1045	15,4155
	0,5	1	3,73333*	1,08764	0,020	0,5778	6,8889
	2	1	0,61000	1,08764	0,969	-2,5455	3,7655
	5	1	4,22333*	1,08764	0,009	1,0678	7,3789
	10	1	8,97333*	1,08764	0,000	5,8178	12,1289
500 UNT	0,1	0,5	5,13333*	1,67951	0,038	0,2606	10,0060
	1	0,5	5,19667*	1,67951	0,036	0,3240	10,0694
	2	0,5	5,49667*	1,67951	0,026	0,6240	10,3694
	5	0,5	6,74000*	1,67951	0,007	1,8673	11,6127
	10	0,5	13,55333*	1,67951	0,000	8,6806	18,4260

Anexo 4.3. pH óptimo del coagulante natural y químico

Prueba de ANOVA

Nivel de turbidez	Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
20 UNT	Dosis	67,790	5	13,558	25,492	0,000
	pH	255,204	2	127,602	239,920	0,000
	Dosis * pH	16,761	10	1,676	3,151	0,005
	Error	19,147	36	0,532		
	Total	358,902	53			
50 UNT	Dosis	143,263	5	28,653	31,214	0,000
	pH	610,081	2	305,041	332,312	0,000
	Dosis * pH	54,550	10	5,455	5,943	0,000
	Error	33,046	36	0,918		
	Total	840,94	53			
100 UNT	Dosis	69,771	5	13,954	13,173	0,000
	pH	916,689	2	458,345	432,692	0,000
	Dosis * pH	48,024	10	4,802	4,534	0,000
	Error	38,134	36	1,059		
	Total	1072,618	53			
300 UNT	Dosis	244,460	5	48,892	19,221	0,000
	pH	1760,861	2	880,431	346,133	0,000
	Dosis * pH	97,175	10	9,717	3,820	0,001
	Error	91,570	36	2,544		
	Total	2194,066	53			
500 UNT	Dosis	552,224	5	110,445	48,649	0,000
	pH	2828,663	2	1414,332	622,986	0,000
	Dosis * pH	353,994	10	35,399	15,593	0,000
	Error	81,729	36	2,270		
	Total	3816,61	53			

Anexo 4.4. Relación Turbidez inicial vs Dosis del coagulante natural y químico

A. Correlaciones Nivel de turbidez y Dosis del coagulante

Correlaciones		Nivel de turbidez	Dosis de coagulante
Nivel de turbidez	Correlación de Pearson	1	,963(**)
	Sig. (bilateral)		,009
	N	5	5
Dosis de coagulante	Correlación de Pearson	,963**	1
	Sig. (bilateral)	,009	
	N	5	5

(**) La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

B. Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
,963 ^a	,927	,903	7,420

C. Prueba de ANOVA

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	2104,811	1	2104,811	38,225	,009 ^b
Residuo	165,189	3	55,063		
Total	2270,000	4			

D. Coeficientes

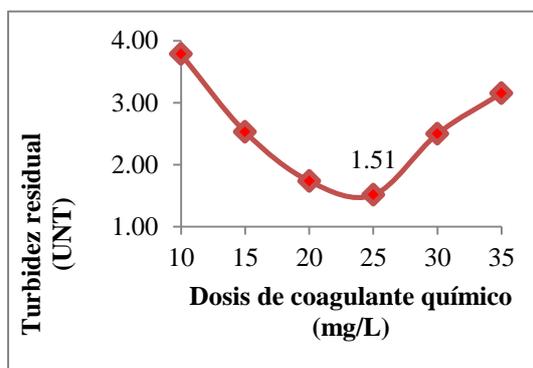
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B	
	B	Error estándar	Beta			Límite inferior	Límite superior
(Constante)	37,070	4,857		7,632	,005	21,612	52,528
Nivel de turbidez	,113	,018	,963	6,183	,009	,055	,171

Anexo 5. Resultados turbiedad residual - parámetros óptimos coagulante químico

Anexo 5.1 Resultados en muestras de 20 UNT

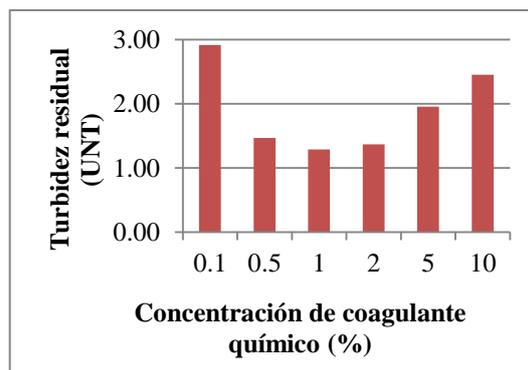
A. Dosis óptima

Nivel de turbidez (UNT)	Jarra	Dosis	Turbiedad residual promedio
		mg/L	UNT
20	1	10	3.78
	2	15	2.53
	3	20	1.74
	4	25	1.51
	5	30	2.50
	6	35	3.15



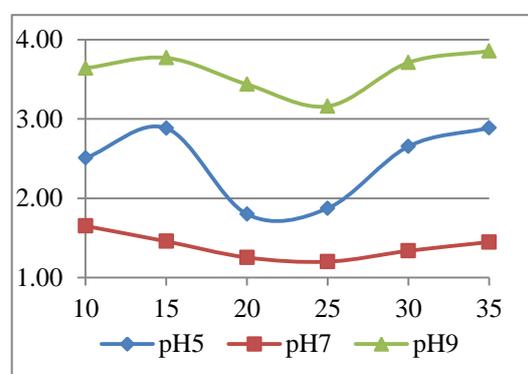
B. Concentración óptima

Nivel de turbidez	N° Jarra	Dosis óptima	CC	Turbiedad residual promedio
		mg/L	%	UNT
20	1	25	0.1	2.91
	2	25	0.5	1.47
	3	25	1	1.29
	4	25	2	1.37
	5	25	5	1.95
	6	25	10	2.45



C. Concentración óptima

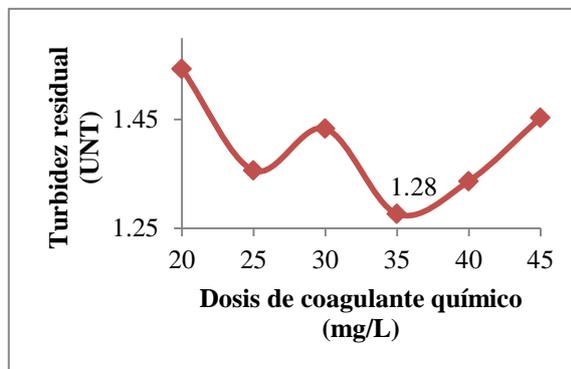
Nivel de turbidez	N° Jarra	Dosis mg/L	Turbiedad residual promedio		
			pH 5	pH 7	pH 9
			UNT	UNT	UNT
20	1	10	2.51	1.65	3.16
	2	15	2.88	1.46	3.77
	3	20	1.80	1.25	3.64
	4	25	1.87	1.20	3.64
	5	30	1.89	1.34	3.71
	6	35	1.89	1.45	3.86



Anexo 5.2 Resultados en muestras de 50 UNT

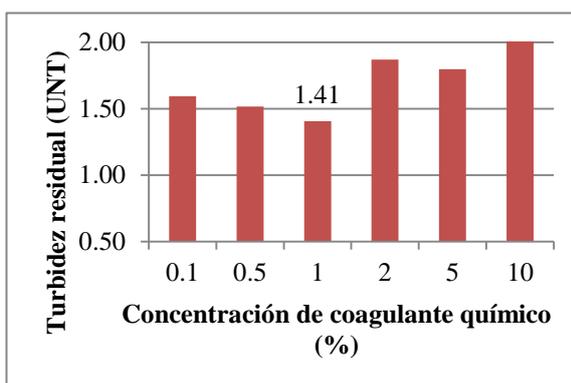
A. Dosis óptima

Nivel de turbidez UNT	N° Jarra	Dosis	Turbiedad residual promedio
		mg/L	UNT
50	1	20	1.54
	2	25	1.36
	3	30	1.43
	4	35	1.28
	5	40	1.34
	6	45	1.45



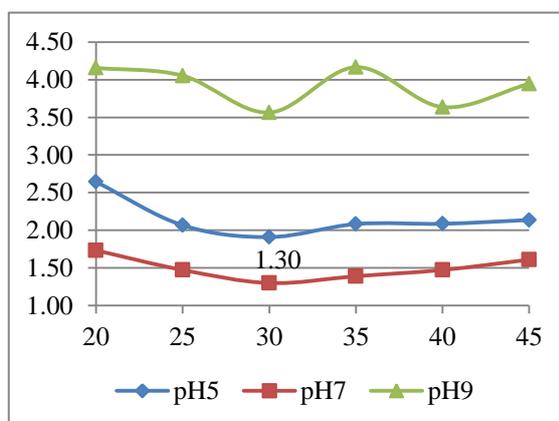
B. Concentración óptima

Nivel de turbidez UNT	N° Jarra	Dosis óptima	CC	Turbiedad residual promedio
		mg/L	%	UNT
50	1	35	0.1	1.59
	2	35	0.5	1.52
	3	35	1	1.41
	4	35	2	1.87
	5	35	5	1.80
	6	35	10	2.02



C. pH óptimo

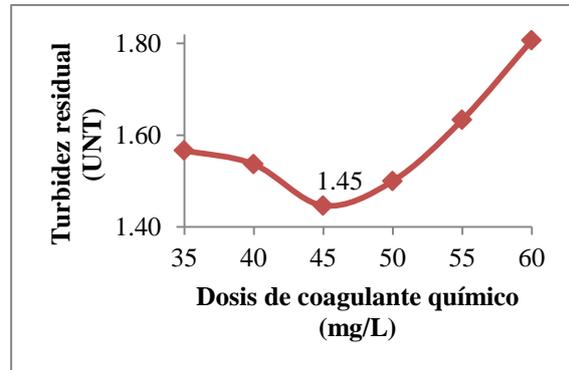
Nivel de turbidez UNT	N° Jarra	Dosis	Turbiedad residual promedio		
			pH 5	pH 7	pH 9
		mg/L	UNT	UNT	UNT
50	1	20	2.64	1.73	4.16
	2	25	2.07	1.47	4.05
	3	30	1.91	1.30	3.56
	4	35	2.08	1.39	4.17
	5	40	2.09	1.47	3.64
	6	45	2.14	1.61	3.95



Anexo 5.3 Resultados en muestras de 100 UNT

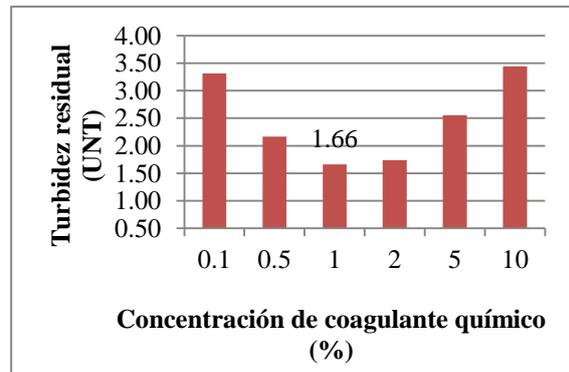
A. Dosis óptima

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis	Turbiedad residual promedio
		mg/L	UNT
100	1	35	1.57
	2	40	1.54
	3	45	1.45
	4	50	1.50
	5	55	1.63
	6	60	1.81



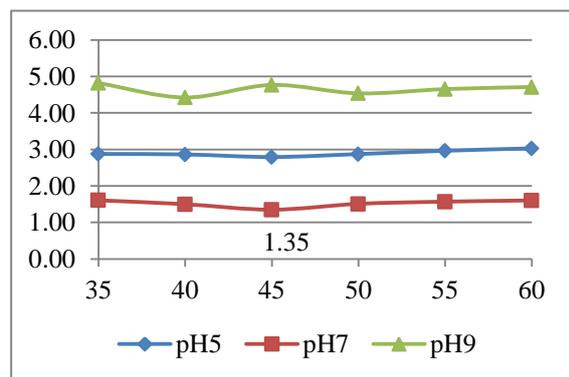
B. Concentración óptima

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima	CC	Turbiedad residual promedio
		mg/L	%	UNT
100	1	45	0.1	3.31
	2	45	0.5	2.16
	3	45	1	1.66
	4	45	2	1.74
	5	45	5	2.56
	6	45	10	3.44



C. pH óptimo

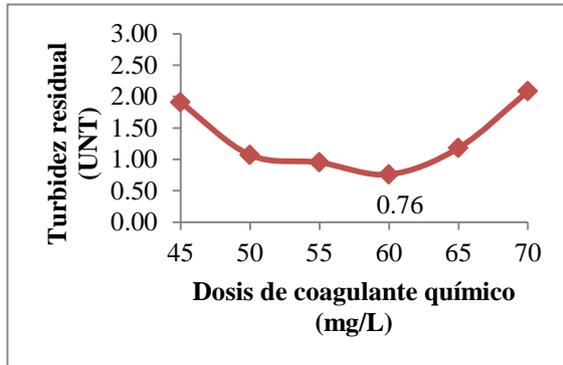
Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis mg/L	Turbiedad residual promedio		
			pH 5	pH 7	pH 9
			UNT	UNT	UNT
100	1	35	2.88	1.61	4.82
	2	40	2.86	1.50	4.42
	3	45	2.79	1.35	4.77
	4	50	2.87	1.51	4.54
	5	55	2.96	1.57	4.65
	6	60	3.03	1.60	4.71



Anexo 5.4 Resultados en muestras de 300 UNT

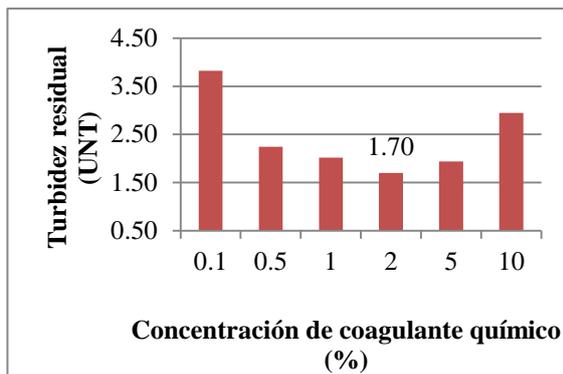
A. Dosis óptima

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis	Turbiedad residual promedio
		mg/L	UNT
300	1	45	1.91
	2	50	1.07
	3	55	0.95
	4	60	0.76
	5	65	1.18
	6	70	2.08



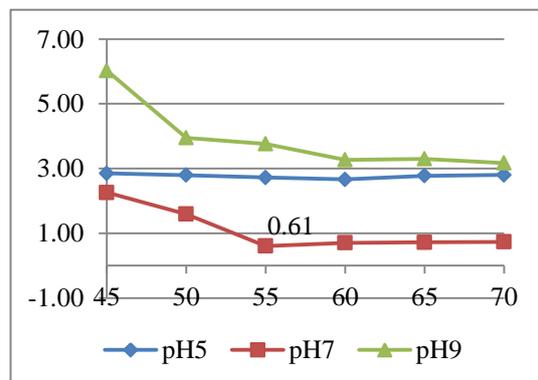
B. Concentración óptima

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima	CC	Turbiedad residual promedio
		mg/L	%	UNT
300	1	60	0.1	3.82
	2	60	0.5	2.25
	3	60	1	2.02
	4	60	2	1.70
	5	60	5	1.94
	6	60	10	2.95



C. pH óptimo

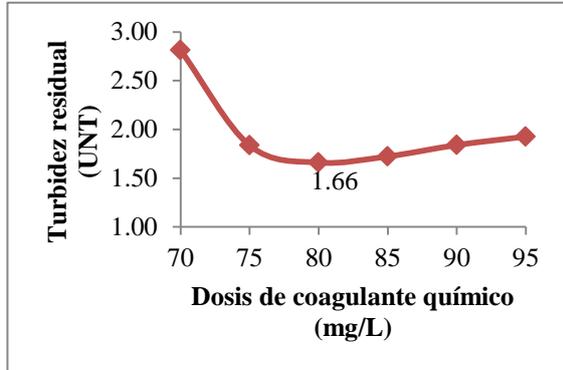
Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis	Turbiedad residual promedio		
			pH 5	pH 7	pH 9
		mg/L	UNT	UNT	UNT
300	1	45	2.85	2.26	6.03
	2	50	2.80	1.60	3.95
	3	55	2.72	0.61	3.76
	4	60	2.67	0.71	3.27
	5	65	2.78	0.72	3.30
	6	70	2.80	0.74	3.17



Anexo 5.5 Resultados en muestras de 500 UNT

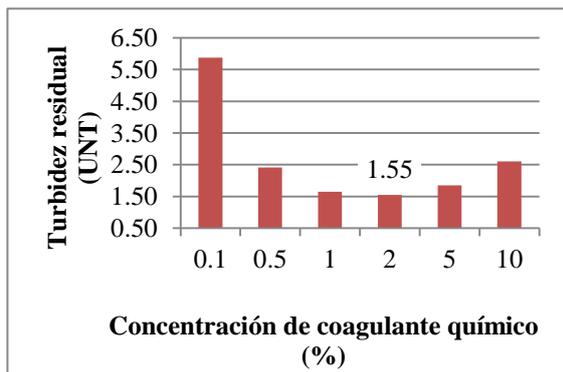
A. Dosis óptima

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis	Turbiedad residual promedio
		mg/L	UNT
500	1	70	2.81
	2	75	1.84
	3	80	1.66
	4	85	1.72
	5	90	1.84
	6	95	1.93



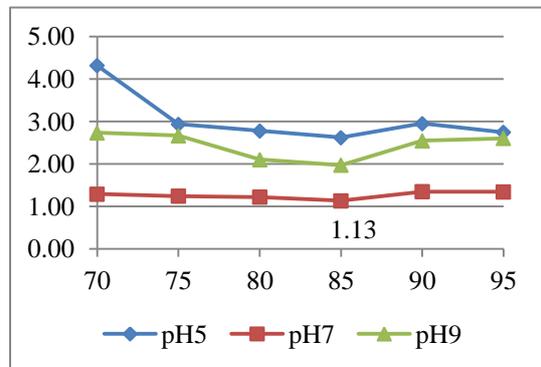
B. Concentración óptima

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis óptima	CC	Turbiedad residual promedio
		mg/L	%	UNT
500	1	80	0.1	5.87
	2	80	0.5	2.42
	3	80	1	1.65
	4	80	2	1.55
	5	80	5	1.85
	6	80	10	2.60



C. pH óptimo

Nivel de turbidez (UNT)	N° Jarra	Dosis mg/L	Turbiedad residual promedio		
			pH 5	pH 7	pH 9
			UNT	UNT	UNT
500	1	70	4.32	1.29	2.73
	2	75	2.94	1.24	2.67
	3	80	2.78	1.22	2.10
	4	85	2.62	1.13	1.97
	5	90	2.95	1.35	2.54
	6	95	2.74	1.34	2.60



Anexo 6. Fotografías del ensayo de la prueba de jarras



Muestras de 500 UNT con coagulante natural



Muestras de 300 UNT con coagulante natural



Muestras de 100 UNT con coagulante natural



Muestras de 50 UNT con coagulante natural



Muestras de 20 UNT con coagulante natural



Comparación en muestras de 500 UNT

(izquierda coagulante natural, derecha coagulante químico)



Comparación en muestras de 300 UNT

(izquierda coagulante natural, derecha coagulante químico)



Comparación en muestras de 100 UNT

(izquierda coagulante natural, derecha coagulante químico)

