



**“Evaluación de la eficiencia de coagulantes naturales en el tratamiento de las aguas residuales del café”**

**Laura Vanessa Quintero Yepes**

**Cohorte XIII**

Director:

Nelson Rodríguez Valencia. PhD.

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas

Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Manizales, Colombia

2017

**“Evaluación de la eficiencia de coagulantes naturales en el tratamiento de las aguas  
residuales del café”**

**Laura Vanessa Quintero Yepes**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente**

Director:

Nelson Rodríguez Valencia. PhD.

Investigador Científico III. Cenicafé

Línea de Investigación:

Biosistemas Integrados

Director: Jhon Fredy Betancur PhD.

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas

Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Manizales, Colombia

2017

*A mis padres y mi hermana por su apoyo incondicional.*

*Agradezco a Dios,  
al Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé,  
y a todas las personas que contribuyeron en la ejecución de este trabajo,  
especialmente al Dr. Nelson Rodríguez Valencia y a Jenifer Galeano Serna.*

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	10
ABSTRACT.....	11
1. INTRODUCCIÓN .....	12
2. JUSTIFICACIÓN .....	14
3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	16
3.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	16
4. OBJETIVOS .....	17
Objetivo General:.....	17
Objetivos Específicos: .....	17
5. HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	18
6. MARCO TEÓRICO.....	19
6.1. Marco Conceptual.....	19
6.1.1. Beneficio húmedo del café.....	19
6.1.2. Tratamiento de las aguas residuales.....	21
6.1.3. Coagulantes Naturales .....	24
6.1.4. Descripción taxonómica de las especies vegetales .....	26
6.2. Marco Contextual.....	27
6.3. Marco Normativo.....	30
7. MATERIALES Y MÉTODOS .....	34
7.1 Selección del material vegetal a evaluar .....	34
7.2 Extracción del compuesto coagulante.....	34
7.3 Caracterización de los extractos obtenidos .....	36
7.5. Evaluación del efecto coagulante de las 4 plantas seleccionadas .....	38
7.6. Metodologías utilizadas en las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas .....	40
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	42
8.1. Selección de las especies a evaluar .....	42
8.2. Caracterización de los extractos.....	42
8.3. Tratamiento primario .....	43
8.4. Pruebas de coagulación.....	49
8.4.1. Moringa Oleifera.....	49
8.4.2. Jatropha Curcas .....	60

8.4.3 Balso y Astromelio .....	66
8.4.4. Ensayos de coagulación con sulfato de aluminio (Testigo).....	67
8.5. Caracterización fisicoquímica del agua residual tratada.....	71
8.5.1. Análisis estadístico de los resultados obtenidos .....	75
8.5.2. Caracterización fisicoquímica final al agua residual tratada .....	80
8.6. Porcentajes de precipitado y material flotante en los tratamientos.....	83
9. CONCLUSIONES .....	84
10. RECOMENDACIONES.....	87
11. LITERATURA CITADA .....	88
12. ANEXOS .....	93

## Lista de Tablas

Tabla 1. Valores promedio de la caracterización fisicoquímica de los extractos .....	42
Tabla 2. Resultados del tratamiento primario utilizando fuentes de calcio .....	43
Tabla 3. Resultado del tratamiento primario utilizando diferentes dosis de hidróxido de calcio .....	45
Tabla 4. Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua residual proveniente del tratamiento primario ...	46
Tabla 5. Resultado del tratamiento primario en aguas residuales del beneficio a una concentración de 25000 ppm	47
Tabla 6. Prueba de Coagulación con Moringa a pH original.....	50
Tabla 7. Pruebas de coagulación con el agua residual proveniente del tratamiento primario .....	50
Tabla 8. Resultados de la evaluación utilizando la mezcla de hidróxido de calcio y Moringa.....	52
Tabla 9. Resultados de la evaluación utilizando el extracto líquido de Moringa.....	55
Tabla 10. Resultados de la evaluación utilizando agua residual a 25000 ppm.....	58
Tabla 11. Resultados de la evaluación del efecto coagulante de <i>Jatropha</i> sobre agua residual a 12500 ppm.....	61
Tabla 12. Resultados de la evaluación del efecto coagulante de <i>Jatropha</i> sobre agua residual .....	64
Tabla 13. Resultados de las pruebas de coagulación con sulfato de aluminio en agua proveniente del tratamiento primario.....	68
Tabla 14. Resultados del tratamiento del agua residual con la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio	69
Tabla 15. Resultados del tratamiento del agua residual con la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio (Agua original a 25000 ppm) .....	70
Tabla 16. Caracterizaciones iniciales del agua residual sin realizar los tratamientos de coagulación. ....	72
Tabla 17. Caracterizaciones fisicoquímicas del agua residual tratada con las dosis óptimas para cada una de las evaluaciones realizadas. (ARB1).....	72
Tabla 18. Caracterizaciones fisicoquímicas del agua residual tratada con las dosis óptimas para cada una de las evaluaciones realizadas. (ARB2).....	73
Tabla 19. Tratamientos evaluados para el agua residual a 12500 ppm.....	75
Tabla 20. Tratamientos evaluados para el agua residual a 25000 ppm.....	76
Tabla 21. Resultados Análisis de varianza para la remoción de DQO a una concentración inicial del agua residual de 12500 ppm .....	76
Tabla 22. Resultados Análisis de varianza para la remoción de SST a una concentración inicial del agua residual de 12500 ppm .....	76
Tabla 23. Resultados Análisis de varianza para la remoción de DQO a una concentración inicial del agua residual de 25000 ppm .....	77
Tabla 24. Resultados Análisis de varianza para la remoción de SST a una concentración inicial del agua residual de 25000 ppm .....	77
Tabla 25. Caracterización fisicoquímica final del agua residual tratada en los tratamientos más eficientes. ....	80
Tabla 26. Caracterización fisicoquímica final del agua residual tratada en los tratamientos más eficientes. ....	81
Tabla 27. Cumplimiento del agua residual tratada con la normativa ambiental vigente para vertimientos a cuerpo de agua. ....	81
Tabla 28. Cumplimiento del agua residual tratada con la normativa ambiental vigente para vertimientos al suelo.	82
Tabla 29. Porcentajes de precipitados/flotantes para los tratamientos óptimos.....	83

## Lista de Gráficas

Gráfica 1. Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada en el tratamiento primario .....	43
Gráfica 2. Comportamiento del pH del agua residual tratada en el tratamiento primario. ....	44
Gráfica 3. Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada con hidróxido de calcio. ....	45
Gráfica 4. Comportamiento del pH del agua residual tratada con hidróxido de calcio. ....	46
Gráfica 5. Comportamiento de la absorbancia en el tratamiento primario utilizando aguas residuales a una concentración de 25000 ppm.....	48
Gráfica 6. Comportamiento del pH en el tratamiento primario utilizando aguas residuales a una concentración de 25000 ppm.....	48
Gráfica 7. Comportamiento de la absorbancia en las pruebas de coagulación utilizando agua residual proveniente del tratamiento primario .....	51
Gráfica 8. Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada adicionando hidróxido de calcio y Moringa al tiempo .....	53
Gráfica 9. Comportamiento del pH del agua residual tratada adicionando hidróxido de calcio y Moringa al tiempo .....	53
Gráfica 10. Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada utilizando el extracto líquido de Moringa .....	56
Gráfica 11. Comportamiento del pH del agua residual tratada utilizando el extracto líquido de Moringa. ....	56
Gráfica 12. Comportamiento de la absorbancia en las pruebas de coagulación con Moringa en agua residual a una concentración de 25000 ppm. ....	58
Gráfica 13. Comportamiento del pH en las pruebas de coagulación con Moringa en agua residual a una concentración de 25000 ppm.....	59
Gráfica 14. Comportamiento de la absorbancia en las pruebas de coagulación con Jatropha en agua residual a 12500 ppm. ....	61
Gráfica 15. Comportamiento del pH en las pruebas de coagulación con Jatropha en agua residual a 12500 ppm. .	62
Gráfica 16. Comportamiento de la absorbancia en las pruebas de coagulación con Jatropha en agua residual a 25000 ppm. ....	64
Gráfica 17. Comportamiento del pH en las pruebas de coagulación con Jatropha en agua residual a 25000 ppm. ..	65
Gráfica 18. Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada con sulfato de aluminio .....	68
Gráfica 19. Comportamiento de la absorbancia en el agua residual tratada con la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio. ....	69
Gráfica 20. Comportamiento de la absorbancia en el agua residual tratada con la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio. (Agua residual a 25000 ppm).....	71



## Lista de Figuras

<i>Figura 1. Cargas contaminantes potencialmente vertidas a los sistemas hídricos (t/año) 2012. ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3. Clasificación Taxonómica de Jatropha .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4. Clasificación Taxonómica del Balso .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5. Clasificación Taxonómica del Astromelio .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Partes de la planta seleccionadas para realizar la extracción.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 7. Semillas de Jatropha y Moringa sin cáscara.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 8. Extracción del compuesto coagulante en las diferentes plantas. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 9. Caracterización fisicoquímica de los extractos obtenidos .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 10. Evaluación de tres cales en el tratamiento primario del agua residual .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 11. Tratamiento primario del agua residual con hidróxido de calcio .....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 12. Evaluación del efecto coagulante de las plantas evaluadas.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 13. Caracterizaciones fisicoquímicas realizadas .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14. Aspecto del agua después del tratamiento primario con hidróxido de calcio .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 15. Aspecto del agua residual proveniente del tratamiento primario tratada posteriormente con Moringa ..</i>	<i>51</i>
<i>Figura 16. Aspecto del agua residual tratada adicionando hidróxido de calcio y Moringa.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 17. Aspecto del agua residual a 25000 ppm antes y después del tratamiento. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 18. Aspecto del agua residual tratada con el extracto de Jatropha .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 19. Aspecto del agua residual después de la aplicación de balso y astromelio .....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 20. Aspecto del precipitado y el material flotante .....</i>	<i>83</i>

## RESUMEN

Con el propósito de generar alternativas costo eficientes y de fácil implementación por parte de los caficultores en el tratamiento de las aguas residuales del café provenientes del lavado en los tanques de fermentación, se seleccionaron 4 especies vegetales que permitieran la extracción de compuestos coagulantes con aplicabilidad en la depuración de aguas residuales, tales como: Moringa (*Moringa oleifera*), Jatropha (*Jatropha curcas*), Balso (*Heliocarpus popayanesis*) y Astromelio (*Hibiscus rosa sinensis*).

Con el fin de acondicionar el pH del agua residual al rango de acción de los coagulantes naturales, se evaluaron tres tipos de cal: Hidróxido de Calcio, Cal Nare y Cal Dolomita, actuando éstas como tratamiento primario. Las evaluaciones permitieron seleccionar al hidróxido de calcio (dosis entre 2000 y 4600 ppm) como el alcalinizante apropiado, con el cual se lograron remociones medias en el rango 48,7 - 49% en la carga orgánica, expresada como DQO y elevar el pH del rango 4,0-4,5 al rango 9,5 - 10,0

Posteriormente se realizó la evaluación de la capacidad de depuración de los extractos sobre aguas residuales del café a pH original, después de realizarle tratamiento primario con hidróxido de calcio y adicionando al tiempo el hidróxido de calcio y seguido del extracto. Para ello se evaluó el extracto seco y molido obtenido de las 4 especies vegetales seleccionadas y el extracto después de realizarle la extracción de grasas y proteína.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de varianza, para los tratamientos evaluados utilizando agua residual del café a una concentración de 12500 ppm como DQO (valor mínimo de concentración proveniente del beneficio ecológico del fruto) se logró determinar que no se presentaron diferencias estadísticas, a un grado de confiabilidad del 95%, en la remoción de DQO para los tratamientos T6: Extracto de *Jatropha curcas* (1500 ppm)+Hidróxido de calcio (3000 ppm), remoción de DQO del 78,77%; T5: Extracto de *Jatropha curcas* (1500 ppm)+Hidróxido de calcio (2600 ppm), remoción de DQO 78,37%; T4: Extracto de *Jatropha curcas* (1500 ppm), remoción de DQO del 77,91%, y los cuales fueron estadísticamente diferentes del T2: Extracto de *Moringa oleifera* (4000 ppm)+Hidróxido de calcio (2600 ppm) y de T1: Tratamiento Testigo con sulfato de aluminio; pero entre estos dos últimos tratamientos no se presentaron diferencias estadísticas a un grado de confiabilidad del 95%.

Para los tratamientos evaluados utilizando agua residual del café a una concentración de 25000 ppm como DQO (valor máximo de concentración proveniente del beneficio ecológico del fruto utilizando tanques para el lavado del grano) se logró determinar que no se presentaron diferencias estadísticas, a un grado de confiabilidad del 95%, en la remoción de DQO para los tratamientos T1: Tratamiento Testigo con sulfato de aluminio, remoción de DQO del 77,93% y T3: Extracto de *Moringa oleifera* (5000 ppm)+Hidróxido de calcio (4600 ppm), remoción de DQO del 76,91%.

El presente estudio permitió la selección de extractos de *Jatropha Curcas* y *Moringa oleifera* como los apropiados para el tratamiento de las aguas residuales del café a concentraciones de DQO de 12500 ppm y 25000 ppm, respectivamente, generando alternativas diferentes al tratamiento biológico y químico con sales de Fe y Al.

**Palabras Claves:** Aguas residuales del café, coagulantes naturales, depuración de aguas, *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas*, contaminación hídrica.

## ABSTRACT

In order to generate economical and easy alternatives to implement for coffee producers in the treatment of coffee wastewater from fermentation tanks, 4 plant species were selected that they allowed the extraction of coagulant compounds with applicability in coffee wastewater purification, such as, *Moringa oleifera*, *Jatropha (Jatropha curcas)*, *Balso (Heliocharpus popayanesis)* y *Astromelio (Hibiscus rosa sinensis)*.

With the purpose to condition the pH of the coffee wastewater to the range of natural coagulants action, three types of lime were evaluated: Calcium Hydroxide, Cal Nare and Cal Dolomite, acting as primary treatment. The evaluations allowed to select calcium hydroxide (doses between 2000 and 4600 ppm) as the appropriate alkalizing agent, with which average removal of 48,7 to 49% in the organic load, expressed as COD were achieved, and raised the pH range from 4,0- 4.5 to 9,5-10.0.

After that, the evaluation of the purification capacity of the natural extracts in the coffee wastewater was carried out, at an original pH, after the treatment with calcium hydroxide and in addition to the calcium hydroxide and then the extract. For this, the dry and ground extract obtained from the four selected plant species and the extract after the extraction of fats and protein were evaluated.

According to the results obtained in the analysis of variance, for the treatments evaluated using coffee wastewater at a concentration of 12500 ppm as COD (minimum concentration value from the ecological process of the coffee), it was possible to determine that there were no statistical differences, at a 95% confidence level, in COD removal for the treatments: T6 *Jatropha curcas* Extract (1500 ppm) + Calcium Hydroxide (3000 ppm), COD removal of 78.77%; T5: *Jatropha curcas* a extract (1500 ppm) + Calcium hydroxide (2600 ppm), removal of COD 78.37%; T4: *Jatropha curcas* Extract (1500 ppm), COD removal of 77.91%, and they which were statistically different from T2: *Moringa oleifera* Extract (4000 ppm) + Calcium Hydroxide (2600 ppm) and T1: Witness Treatment with aluminum sulfate; But between these last two treatments there were no statistical differences at a degree of reliability of 95%.

For the treatments evaluated using the coffee wastewater at a concentration of 25000 ppm as COD (maximum value of concentration from the ecological process of the coffee using tanks to wash the grain) T1: Witness Treatment with aluminum sulfate, removal of COD Of 77.93% and T3: *Moringa oleifera* extract (5000 ppm) + Calcium hydroxide (4600 ppm), COD removal of 76.91%.

The present study allowed the selection of extracts of *Jatropha curcas* and *Moringa oleifera* as appropriate for the treatment of coffee wastewater at COD concentrations of 12,500 ppm and 25,000 ppm, respectively, generating different alternatives to the biological and chemical treatment with Fe and Al.

**Key Words:** Coffee wastewater, natural coagulants, water purification, *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas*, water pollution.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café, se caracterizan por tener una alta acidez (entre 110 y 220 mg NaOH/g DQO), unos valores de pH bajos (entre 3 y 4) y unas altas concentraciones de contaminación orgánica, expresada como DQO (entre 25.000 y 100.000 mg/L, dependiendo de la cantidad de agua utilizada en el beneficio del fruto de café) (Zambrano y Rodríguez, 2008).

En Cenicafé, desde 1984, se han evaluado diferentes procesos (físicos, químicos y biológicos) para disminuir la contaminación generada por las aguas residuales del café y obtener unos vertidos que cumplan con lo dispuesto por la normativa colombiana en el decreto 1594 de 1984 (vigente aún para vertimientos al suelo) y en la resolución 631 del 2015 (para vertidos a cuerpos de agua superficial) (Zambrano & Rodríguez, 2008).

Los resultados obtenidos en las investigaciones desarrolladas en Cenicafé, establecen que para la topografía colombiana, por costo-eficiencia, el mejor tratamiento para las aguas residuales del café es biológico, utilizando la digestión anaeróbica y empleando sistemas modulares para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del café, SMTA, (Zambrano & Rodríguez, 2008).

Los altos tiempos de retención hidráulica en los SMTA (una semana), aunado a la gran sensibilidad del sistema biológico ante incrementos de cargas hidráulicas y cargas orgánicas y los altos tiempos requeridos para la recuperación del sistema (superiores a 1 mes) (Zambrano & Rodríguez, 2008), han hecho necesario la búsqueda de alternativas de tratamiento que permitan eliminar las dificultades que están presentando los sistemas

biológicos anaerobios y que sigan siendo costo-efectivos para el tratamiento de las aguas residuales del café..

La presente investigación ha tenido como objetivo evaluar el uso de cuatro plantas con capacidad depurativa como alternativa al tratamiento biológico de las aguas residuales del café y comparar su eficiencia con la obtenida usando sales químicas, valorando parámetros como la eficiencia de remoción de carga orgánica, en términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Mediante el presente estudio se busca responder a la pregunta ¿Cuál es la eficiencia en la remoción de carga orgánica, medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO), de cuatro coagulantes naturales en el proceso de tratamiento de las aguas residuales del Beneficio del Café?

Para ello se realizaron diferentes pruebas de tratamiento al agua residual del beneficio del café utilizando extractos naturales, se seleccionaron las dosis óptimas de cada uno de los extractos evaluados y se determinó la carga orgánica (medida como DQO) del agua residual tratada y se comparó con la carga orgánica del agua residual sin tratamiento para determinar la eficiencia de remoción en cada uno de los tratamientos.

## 2. JUSTIFICACIÓN

En Cenicafé se han desarrollado sistemas biológicos para el tratamiento de las aguas residuales del café, que permiten cumplir con la normativa ambiental vigente y disminuir los impactos negativos ocasionados en la disposición final de los vertimientos, dichos sistemas biológicos de tratamiento tienen como característica unos tiempos de retención hidráulica de 1 semana y requieren de un monitoreo permanente por parte del usuario de la tecnología para evitar que se presenten sobrecargas orgánicas, hidráulicas y el taponamiento de tuberías, lo cual se convierte en un inconveniente en el momento de adoptar la tecnología por parte del caficultor.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario realizar investigaciones tendientes a eliminar los inconvenientes que presenta la digestión anaerobia, ofreciéndole al productor de café alternativas costo-efectivas que les permita disminuir el tamaño de las plantas de tratamiento, reducir los tiempos de procesos y reducir el tiempo y costo del mantenimiento de las plantas de tratamiento.

Una de las alternativas que puede ser viable para la depuración de las aguas residuales del beneficio del café es el tratamiento químico por medio de procesos de coagulación-floculación con sales químicas, pero dicho proceso tiene altos costos y el uso de productos químicos como coagulantes genera un impacto ambiental negativo en las fuentes hídricas y en la salud humana, además de que muchos productores están certificados con diferentes sellos ambientales, que les restringen el uso de algunos productos químicos. Por tal razón, el uso de coagulantes naturales obtenidos a partir de diferentes partes de diversas especies de plantas, los cuales ejercen un papel similar al de las sales químicas, se constituye en una

alternativa que debe ser estudiada y evaluada con el fin de satisfacer las necesidades tecnológicas de los caficultores en el campo del tratamiento de las aguas residuales.

La evaluación de especies vegetales para el tratamiento de aguas residuales del beneficio del café es de gran importancia dado que: 1. Las plantas se pueden tener cultivadas en la finca, por lo tanto no implica un costo adicional, 2. Los tiempos de proceso en los tratamientos con extractos naturales son más cortos que los necesarios para los tratamientos biológicos, 3. Los lodos resultantes del proceso de coagulación utilizando extractos naturales pueden ser utilizados en el acondicionamiento de suelos.

### **3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

Dada la baja implementación de los sistemas modulares de tratamiento anaerobio, por parte de los caficultores, para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, aduciendo su gran complejidad en el manejo, por los permanentes taponamientos de las tuberías y por la alta sensibilidad de los sistemas al incremento de cargas hidráulicas y orgánicas y a la lenta respuesta del sistema biológico en su recuperación ante las sobrecargas, se requiere evaluar alternativas de tratamiento a las aguas residuales del café diferentes a los sistemas que se utilizan actualmente, que permitan disminuir los tiempos de proceso, el tamaño de las plantas de tratamiento y que sean de fácil implementación por parte de los productores.

#### **3.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cuál es la eficiencia en la remoción de carga orgánica, medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO), de cuatro coagulantes naturales en el proceso de tratamiento de las aguas residuales del Beneficio del Café?

La mayor contaminación en las aguas residuales del café es de tipo orgánico constituido por sólidos suspendidos, sólidos disueltos y por diversos compuestos orgánicos, por lo que un parámetro como la DQO permitiría evaluar la eficiencia real de eliminación de carga orgánica de las aguas residuales del café por la acción coagulante de productos naturales.



#### **4. OBJETIVOS**

##### **Objetivo General:**

Evaluar la eficiencia de cuatro coagulantes naturales en el tratamiento de las aguas residuales del café.

##### **Objetivos Específicos:**

1. Generar la metodología adecuada para la extracción y aplicación de los coagulantes obtenidos de las diferentes plantas seleccionadas.
2. Evaluar las características fisicoquímicas de los coagulantes obtenidos.
3. Evaluar la eficiencia de compuestos de calcio para adecuar el pH de las aguas mieles.
4. Determinar la concentración óptima de los coagulantes obtenidos para realizar el tratamiento de las aguas residuales del café.
5. Calcular la remoción de contaminación en las aguas residuales del café expresada como DQO y Sólidos Suspendedos, por la acción de los coagulantes obtenidos.

## **5. HIPÓTESIS DE TRABAJO**

H1. Al menos uno de los extractos naturales evaluados tiene la misma eficiencia de remoción de carga orgánica expresada como DQO que el coagulante químico (sulfato de aluminio) utilizado como testigo.

H2. Al menos uno de los coagulantes naturales evaluados reduce la carga orgánica expresada como DQO de las aguas residuales del café en un 50%.

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1. Marco Conceptual

El café es producido en las regiones cafeteras de Colombia, delimitadas entre la latitud Norte 1° a 11°15', Longitud Oeste 72° a 78° y rangos específicos de altitud que pueden superar los 2.000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). La recolección selectiva del Café de Colombia, el procedimiento de beneficio o post cosecha por la vía húmeda, el proceso de secado y su posterior clasificación mediante la trilla, garantizan la óptima calidad del producto. La producción media de café en el último año fue de 14,2 millones de sacos (1 saco equivale a 60 kg de café almendra) (Federacafe, 2016)

Tradicionalmente el café ha sido beneficiado por vía húmeda, dando origen a una bebida suave de alta calidad, pero generando problemas de contaminación del medio ambiente (Cenicafé, 2011). De acuerdo con la distribución de los macrocomponentes del fruto fresco y maduro de café, sólo el 9,5% del peso es utilizado en la preparación de la bebida. El 90,5% restante lo constituyen el agua y los subproductos del proceso, de los cuales los principales son la pulpa y el mucílago (Calle, 1977).

#### 6.1.1. Beneficio húmedo del café

##### Proceso de beneficio húmedo del café

El beneficio del café es el proceso mediante el cual se transforma el café cereza en café pergamino seco, es húmedo porque se utiliza agua para el lavado de la semilla (Rodríguez, 2009). En Colombia existen dos tipos de beneficio: Beneficio Convencional y el Beneficio ecológico.

El beneficio convencional es el proceso que tradicionalmente se ha utilizado para transformar el fruto en semilla y en el cual se utiliza agua en las etapas de despulpado, lavado y transporte (del fruto, del café despulpado y del café lavado), con un consumo global cercano a los 40 litros de agua por cada kilogramo de café pergamino seco (cps) (Roa, et al, 1999).

El beneficio ecológico es un proceso de beneficio de café amigable con el ambiente, que permite obtener cafés con la calidad física y de taza característicos del café de Colombia (Rodríguez, et al, 2015), el beneficio ecológico se define como *“Un conjunto de operaciones realizadas para transformar el café cereza en café pergamino seco, conservando la calidad exigida por las normas de comercialización, evitando pérdidas del producto y eliminando procesos innecesarios, lográndose además el aprovechamiento de los subproductos, lo cual representa el mayor ingreso económico para el caficultor y la mínima alteración del agua estrictamente necesaria en el beneficio”* (Roa, et al, 1999).

#### Subproductos generados en el proceso de beneficio del café

En la cuantificación de la Demanda Química de Oxígeno de los subproductos del proceso tradicional de beneficio húmedo de café, constituidos por la pulpa y el mucílago, se encontró, que por cada kilogramo de fruto se producen en promedio 115,1 g de DQO, de los cuales el 73,7% (85 g) provienen de la pulpa y 26,3% (30 g) provienen del mucílago (Rodríguez, et al, 2015)

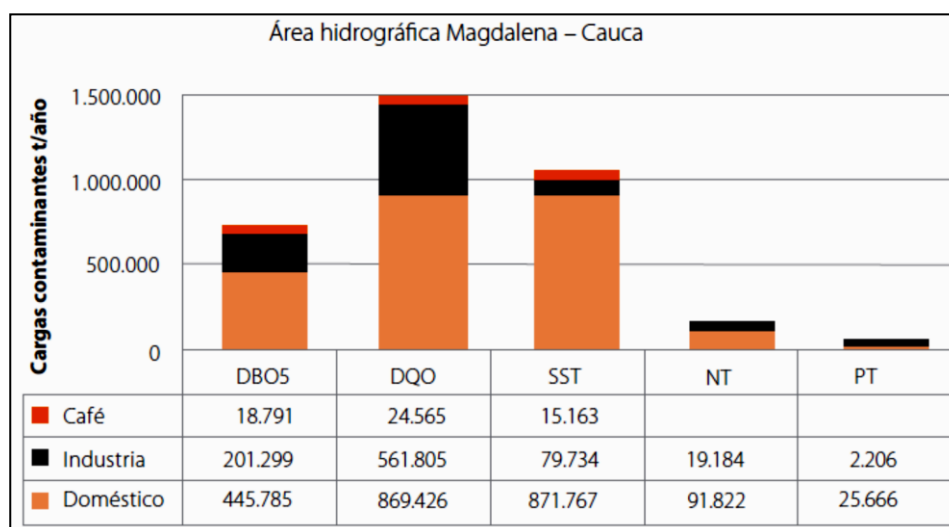
Las aguas residuales que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del café son biodegradables, pero poseen una acidez alta, concentraciones de materia orgánica y sólidos suspendidos altas y demandas químicas de oxígenos altas, del orden de 15000 a 30000 ppm en las aguas mieles, y entre 60000 y 12000 en los lixiviados generados en la mezcla pulpa-

mucilago, lo que corresponde a poderes contaminantes entre 60 y 240 veces superiores a las aguas residuales domésticas (Zambrano & Rodríguez, 2008).

### Contaminación hídrica asociada al cultivo del café

De acuerdo a los resultados presentados en el Estudio Nacional del Agua-ENA 2014, la carga total nacional vertida a los cuerpos de agua de demanda química de oxígeno (DQO), después de tratamiento, es de 1.675.616 t/año, equivalentes a 4.654 t/día, de los cuales la industria aporta el 37%, el sector doméstico 61 %, y el cafetero un 2%. En la Figura 1, se muestra la carga contaminante de materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes que potencialmente alcanzan las áreas hidrográficas Cauca-Magdalena.

**Figura 1.** Cargas contaminantes potencialmente vertidas a los sistemas hídricos (t/año) 2012.



Fuente: (ENA, 2014)

### **6.1.2. Tratamiento de las aguas residuales**

Los tratamientos de las aguas residuales se pueden clasificar dependiendo el nivel de depuración en: preliminares, primarios, secundarios y terciarios; los preliminares preparan el agua residual para posteriores intervenciones (previene que sólidos grandes

entren a la planta y obstruyan tuberías); los primarios remueven una porción de los sólidos suspendidos y de materia orgánica del agua residual (operaciones físicas de remoción); los secundarios se emplean para convertir la materia orgánica disuelta en el agua residual en partículas sedimentables (físico-químicos, procesos anaerobios y aerobios); y el terciario es un proceso de tratamiento fisicoquímico o biológico usado para alcanzar un grado de tratamiento superior al de tratamiento secundario (RAS 2000).

#### Tratamiento de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café

La Federación Nacional de Cafeteros, ha realizado investigaciones en lo relacionado con el tratamiento de las aguas residuales, evaluando en algunos casos, tratamientos físicos y, en otros, tratamientos químicos o biológicos. Desde 1984, existen investigaciones relacionadas con el manejo eficiente del agua en el proceso de beneficio húmedo del café y el tratamiento anaerobio de las aguas residuales generadas en el proceso, tendientes a encontrar la solución más económica para descontaminarlas (CENICAFE, 2011).

En 1984, Cenicafé, estudió las diferentes propuestas disponibles para el tratamiento de las aguas residuales del café. Los procesos aeróbicos, por ejemplo, para el tratamiento de las aguas residuales de café como lodos activados de alta o de baja carga, filtros biológicos, lagunas de oxidación aireadas e irrigación, son soluciones que están drásticamente limitadas por la topografía de la zona cafetera colombiana. Mientras que con la ozonización se concluyó que ésta tenía la capacidad de reducir la carga orgánica pero su costo era excesivo (CENICAFE, 2011). Los sistemas de tratamiento, con excepción de la digestión anaerobia, fueron descartados por aspectos técnicos o económicos (Zambrano & Rodríguez, 2008).

Desde el punto de vista técnico, los procesos anaerobios brindan la posibilidad de reducir la contaminación de aguas residuales con elevada carga orgánica, característica de los efluentes líquidos del proceso de beneficio húmedo del café. Además, los costos de tratamiento anaeróbico son más reducidos si se les compara con los tratamientos convencionales de tipo aeróbico (Zambrano, et al., 1999).

En Cenicafé se desarrolló, para el tratamiento de las aguas residuales del café, el Sistema Modular de tratamiento anaerobio (SMTA) que involucra una tecnología de tratamiento biológico con separación de fases hidrolítica-acidogénica de la metanogénica, apta para alcanzar altas eficiencias en la remoción de carga, en el tratamiento se utilizan microorganismos metanogénicos presentes en el estiércol vacuno o porcino, responsables de la etapa principal del tratamiento de las aguas y se logran eficiencias en remoción de carga superiores al 80% ( Zambrano, et al, 2010)

### Tratamientos Químicos para las aguas

Entre los procesos físico-químicos están la coagulación, floculación, precipitación química, filtración, separación por membranas, adsorción, intercambio iónico, entre otros. (Rodríguez, 2009). La coagulación es un proceso de desestabilización de partículas coloidales debido a la adición de compuestos químicos, conocidos como coagulantes, después de la desestabilización dichas partículas se aglomeran formando floculos que sedimentan fácilmente, lo anterior se conoce como el proceso de floculación. (Vargas & Romero, 2006).

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 los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado. La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos. (Cárdenas, 2000)

Los Coagulantes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso. (Cárdenas, 2000)

Los compuestos químicos más utilizados en el proceso de coagulación-floculación son las sales de hierro y aluminio; el sulfato de aluminio comúnmente conocido como alumbre es uno de los más utilizados en la actualidad. Se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante está mal ajustada. (Arcila, 2016)

El uso de estos compuestos químicos en el tratamiento tanto de aguas residuales como de agua cruda para potabilización han ocasionado diversos problemas tanto ambientales como de salud entre ellos están: problemas medioambientales que con llevan 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 y relación con el cáncer (García, 2007).

### **6.1.3. Coagulantes Naturales**

En los últimos años se ha evaluado en el proceso de coagulación, el uso de coagulantes naturales, los cuales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen



vegetal o animal que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la 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 (García, 2007).

El creciente desarrollo y uso de coagulantes naturales, extraídos a partir de microorganismos, tejidos de plantas o animales; son biodegradables y seguros para la salud humana, producen menos volumen de lodos, generando cantidades que van entre el 20-30 %, mucho menores a las generadas por el empleo de agentes coagulantes metálicos, como el alumbre (Sciban et al, 2009).

Son coagulantes alternativos que pueden tener rendimientos iguales o incluso superiores a los de origen sintético, además tienen un valor agregado relacionado con las características de biodegradabilidad que lo convierten en una alternativa viable desde el punto de vista ambiental. Algunos de los coagulantes de origen natural son almidones y polisacáridos naturales, tales como la celulosa, y el quitosano, siendo este último el objeto de estudio de este trabajo (Nieto & Orellana, 2011)

La mayoría de los extractos naturales se derivan de semillas, de hojas, de cortezas o savia, de raíces y de frutas, extraídos de árboles y de plantas (Pritchard et al, 2009). Los agentes

coagulantes y floculantes naturales, principalmente polisacáridos, son considerados ambientalmente amigables en comparación con los agentes orgánicos e inorgánicos debido a su biodegradabilidad (Anastasakis, *et al.* 2009).

#### 6.1.4. Descripción taxonómica de las especies vegetales

A continuación se realiza una breve descripción de las especies evaluadas, en las figuras 2 a 5 se presenta la descripción taxonómica de cada una de las especies

Moringa Oleifera: *Moringa Oleifera*

Nombres comunes: Moringa, Marango

**Figura 2.** Clasificación Taxonómica de Moringa

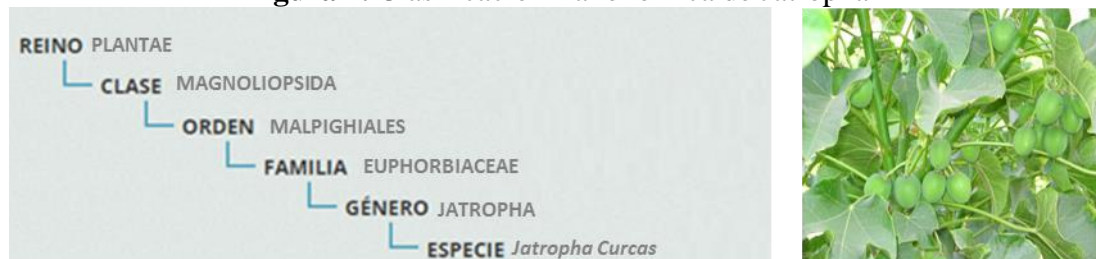


Fuente: SIB. Catálogo de Especies

Jatropha Curcas: *Jatropha Curcas*

Nombres comunes: Piñón, Jatropa

**Figura 2.** Clasificación Taxonómica de Jatropha



Fuente: Adaptado de SIB. Catálogo de Especies

Balso: *Heliocarpus popayanensis*.

Nombres Comunes: Balso, Balso blanco, Balso panelero.

**Figura 3.** Clasificación Taxonómica del Balso



Astromelio: *Hibiscus rosa-sinensis*.

Nombres comunes: Astromelio hibiscus, Bisornkornor, Calleno, Cayeno, Escandaloso, Ketmie odorante, Musk Seed, Resucitado, Rojo, Rosa de China, San Joaquín, San Joaquín.

**Figura 4.** Clasificación Taxonómica del Astromelio



## 6.2. Marco Contextual

Los polímeros orgánicos naturales se han usado por más de 4000 años en India, en África y en China como coagulantes eficientes y como ayudantes de coagulación de aguas con alta turbidez, para uso doméstico en áreas rurales (Guzmán *et al*, 2013).

Las revisiones de los coagulantes naturales a base de plantas se han concentrado principalmente en los cuatro coagulantes naturales más comunes, que incluyen semillas de

Moringa oleifera, semillas de Nirmali, taninos y Opuntia ficus (cactus) en los tratamientos de agua y aguas residuales (Yin, 2010)

Los coagulantes naturales a base de plantas han ganado intereses crecientes de los investigadores a lo largo de los años debido a su biodegradabilidad y naturaleza amigable con el medio ambiente. Los diversos tipos de coagulantes vegetales, incluyendo los residuos de frutas y otros (cactus, cereales, hongos, frutos secos, arbustos y especias), han demostrado actividades prometedoras de coagulación en el tratamiento del agua (Choy, et al 2014).

Se sabe poco sobre otras categorías de plantas con notables propiedades de clarificación del agua. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta estos coagulantes e identificar los hallazgos clave obtenidos de diversos estudios de coagulación realizados previamente. (Choy, et al 2014)

A continuación se mencionan algunas de las investigaciones reportadas en la literatura relacionadas con la utilización de extractos naturales.

Okuda, et al (2001) estudiaron diferentes técnicas de purificación del extracto de Moringa oleifera mediante la utilización de soluciones de cloruro de sodio con el fin de determinar el mecanismo de coagulación, en el estudio se encontró que el pH óptimo para el uso de Moringa es 8 o superior.

Yongabi (2004), reportó haber probado la capacidad coagulante y desinfectante de la Moringa oleifera, Jatropha curcas (Piñón Mexicano), Pleurotus tuberregium sclerotium (Hongo) y Hibiscus sabdariffa (Rosa de Jamaica), comparándolas con el alumbre en muestras de aguas residuales.

Antov, et al (2007), estudiaron la actividad coagulante de extractos de semillas del frijol común (*Phaseolus vulgaris*), utilizando soluciones salinas como medio de extracción, a diferentes concentraciones. Reportan haber obtenido valores altos en concentración de proteína y actividades de coagulación, cercanas al 40% en el extracto crudo, cuando utilizaron 0,5 mol/L de NaCl, demostrando que la purificación de las proteínas extraídas de las semillas del frijol común tiene características de coagulantes naturales.

Fernández, et al. (2008) evaluaron el exudado gomoso de la *Cassia siamea* (goma guar); para ello emplearon agua turbia sintética, con valores de turbidez de 10; 15; 25; 50; 75 y 100 NTU. Los niveles de turbiedad finales alcanzados estuvieron entre 2 - 4 NTU, para una dosis óptima de 50mg/L y disminuciones en el color, hasta valores de 5 UC, con aplicación de 10 – 20mg/L de la goma.

Pritchard, et al (2010) estudiaron el rendimiento de *Moringa oleifera* en comparación con El sulfato de aluminio y el sulfato férrico, en agua de río de baja turbidez, los resultados mostraron que *M. oleifera* eliminó 84% de turbidez y 88% de *E. coli*.

Abidin, et al (2012) evaluaron diferentes procedimientos para la extracción del ingrediente coagulante de *Jatropha*, encontrando que el método de ultrasonido presentó mejores eficiencias, sin embargo se estableció que no es tan viable desde el punto de vista económico por la cantidad de energía que se requiere.

En Colombia, se han realizado investigaciones sobre la utilización de coagulantes naturales, como el almidón de yuca y el de maíz, los cuales, han sido evaluados junto con el sulfato de aluminio y un polielectrolito comercial, como agentes coagulantes de aguas crudas superficiales. Los resultados obtenidos mostraron un buen desempeño del almidón

de maíz, comparable con el polielectrólito y mejor que el sulfato de aluminio B; por el contrario, el almidón de yuca presentó un mal desempeño en estas condiciones y fue el menos efectivo de los agentes coagulantes evaluados (Rodríguez et al. 2007)

De igual forma se ha estudiado la eficiencia de la semilla de *Moringa Oleifera (MO)* como sustancia coagulante en el proceso de coagulación/floculación de las aguas residuales provenientes de centrales de sacrificio. Los resultados demostraron la eficiencia de las semillas de *MO* para remover la turbidez desde 202 y 964 NTU a valores mínimos de 30,9 y 128 NTU, con un porcentaje de remoción de 85%, y 86,7% respectivamente, mientras para remover el color desde 14700 y 10500 PtCo a valores mínimos de 4788 y 700 PtCo alcanzo porcentajes de remoción de 67,4% y 93% respectivamente, con una aplicación de dosis óptima (7500mg/l) a una concentración optima del 5%. (Hernández, et al 2014).

Para el caso de las aguas residuales del café, Gutiérrez, et al (2014), evaluaron el efecto del polvo de semilla de *Moringa oleifera* como coagulante y floculante natural en el tratamiento de aguas residuales del café, en esta investigación se realizó la comparación con sulfato de aluminio encontrándose que el polvo de la semilla de *Moringa* es más efectivo en la remoción de los diferentes parámetros fisicoquímicos. La dosis optima encontrada en el estudio fue de 4g/600ml de agua residual.

### **6.3. Marco Normativo**

Los vertimientos de aguas residuales y los aspectos institucionales para su manejo, están fundamentados, en la Política Nacional para la Gestión del Recurso Hídrico y otras normas específicas que datan desde los años 70, A continuación se menciona la normativa ambiental más relevante en los últimos años y la que está vigente a la fecha

**Decreto 2811 de 1974.** Establece el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Define normas generales de política ambiental y detalla los medios para el desarrollo de la política ambiental. En su capítulo II define la regulación en cuanto a la prevención y control de contaminación del recurso hídrico (República de Colombia, 1975).

**Decreto 1594 de 1984.** Reglamenta usos del agua y residuos líquidos y, entre otros temas, establece metodologías para análisis y seguimiento de calidad de fuentes, obligación de permisos de vertimiento, requerimiento de tratamiento de efluentes, planes de cumplimiento, control y sanciones, normas de calidad para diferentes usos (Ministerio de Salud, 1984). Este Decreto es derogado por el Decreto 3930 de 2010, salvo el artículo 20 que trae la lista de las sustancias que son consideradas de interés sanitario y el artículo 21 el cual define que es un usuario de interés sanitario, estableciendo que es aquel en cuyos vertimientos se puede encontrar alguna de las sustancias listadas en el artículo 20.

**Ley 373 de 1997.** La cual establece el programa para uso eficiente y ahorro del agua y determina particularidades sobre el programa que debe hacer parte de todo plan ambiental regional y municipal. Las Corporaciones Autónomas Regionales aprobarán la implantación y ejecución de dichos programas en coordinación con otras Corporaciones Autónomas que compartan las fuentes que abastecen los diferentes usos (República de Colombia, 1997).

**Reglamento de Agua potable y Saneamiento (RAS).** El Ministerio de Desarrollo Económico en la resolución 1096 de 2000 adopta el RAS como el documento técnico que fija los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas

residuales, de agua potable y saneamiento básico, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia y sostenibilidad (República de Colombia, 2002). En el título C se trata tema de sistemas de potabilización de agua, el título E específicamente trata el diseño para el tratamiento para aguas residuales.

**Decreto N° 3930 de 2010.** Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados., modificando lo contenido en el decreto 1594 de 1984 que estaba vigente hasta esa fecha, con algunos artículos transitoriamente vigentes hasta tanto el Ministerio de Ambiente fije mediante resolución lo que se plantea en estos (República de Colombia, 2010).

**Decreto N° 303 de 2012.** El presente decreto reglamenta parcialmente el artículo 64 del Decreto- Ley 2811 de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico para el componente de concesión de aguas y el componente de autorizaciones de vertimientos (República de Colombia, 2012).

**Decreto N° 2667 de 2012.** Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales.

**Decreto N° 1640 de 2012.** Tiene como objeto reglamentar los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos del país, de conformidad con la estructura definida en la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

**Resolución 1207 de 2014.** Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas, dicha resolución tiene como objeto establecer las disposiciones



relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos.

**Resolución 0631 de 2015.** En la cual se establecen los parámetros y valores límites máximo permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

**Decreto 1076 del 2015.** El decreto 1076 del 26 de mayo de 2015, es una compilación de las normas expedidas por el Gobierno Nacional, el cual pretende recoger en un solo cuerpo normativo todos los decretos reglamentarios vigentes expedidos hasta la fecha, que desarrollan las leyes en materia ambiental.

## **7. MATERIALES Y MÉTODOS**

La investigación se llevó a cabo en el Centro Nacional de Investigaciones de Café-Cenicafé durante el periodo 2015 a 2017 en el laboratorio de aguas de la disciplina de poscosecha. La investigación fue de naturaleza cuantitativa explicativa e implicó el desarrollo de las siguientes etapas: 1. Selección de cuatro especies de plantas presentes en la zona cafetera y con efecto coagulante, para obtener los extractos; 2. extracción del compuesto coagulante; 3. caracterización del extracto; 4. tratamiento primario del agua residual y 5. evaluación del efecto del extracto en la coagulación de las aguas residuales del café.

### **7.1 Selección del material vegetal a evaluar**

Para la selección del material vegetal a evaluar, se realizó una revisión bibliográfica y se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: 1. presencia de las plantas en la zona cafetera, 2. capacidad coagulante, reportada en la literatura.

### **7.2 Extracción del compuesto coagulante**

Para realizar el proceso de tratamiento de las aguas residuales del beneficio por medio del proceso de coagulación-floculación, se seleccionó la parte de la planta que de acuerdo a la literatura presentará el mayor efecto coagulante. Para *Jatropha* y *Moringa* se seleccionaron las semillas, para el balsa se seleccionó el tallo y para el astromelio ramas, hojas y flores, tal como se muestra en la Figura 6.

**Figura 5.** Partes de la planta seleccionadas para realizar la extracción



Fuente: Autora

Las partes de la planta, seleccionadas, se sometieron a procesos de descascarado, secado y molienda. El descascarado se realizó con las semillas de Jatropa y de Moringa, tal como se observa en la Figura 7.

**Figura 6.** Semillas de Jatropa y Moringa sin cáscara



Fuente: Autora

Las semillas descascaradas de Moringa y Jatropa, se secaron en una estufa de convención forzada a 30°C hasta peso constante. Luego se realizó la molienda del material seco y se realizó la extracción del compuesto coagulante, mediante los procedimientos que se describen a continuación:

A las semillas descascaradas de Jatropa y Moringa se les realizó una extracción de grasas por medio de un procedimiento de extracción sólido-líquido (equipo soxhlet) usando etanol como solvente a una concentración de 10% P/V (García, 2007), seguidamente se realizó la extracción de la proteína (compuesto coagulante) utilizando cloruro de sodio a una

concentración de 1N y sometiendo la muestra a un proceso de licuado y posterior filtración (Okuda, 2001) (Figura8).

En el caso del Balso y el Astromelio, el procedimiento que se realizó fue una extracción en fresco del mucílago, para ello la planta se sometió a operaciones de licuefacción, filtración, extracción en etanol y secado del extracto (Quesada, 2014). En la Figura 8 se presentan los procedimientos realizados.

**Figura 7.** Extracción del compuesto coagulante en las diferentes plantas.

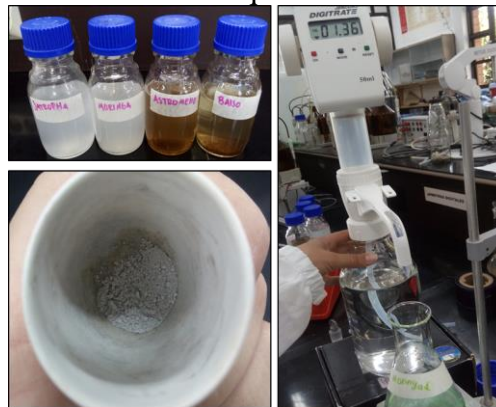


Fuente: Autora

### 7.3 Caracterización de los extractos obtenidos

Después de realizar la extracción del coagulante se realizó la caracterización de los extractos en los siguientes parámetros: pH, DQO (ppm), Nitrógeno total Kjeldahl (%), Fosfatos (ppm), Nitratos (ppm), Carbono (%), en la Figura 9 se observan las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas.

**Figura 8.** Caracterización fisicoquímica de los extractos obtenidos

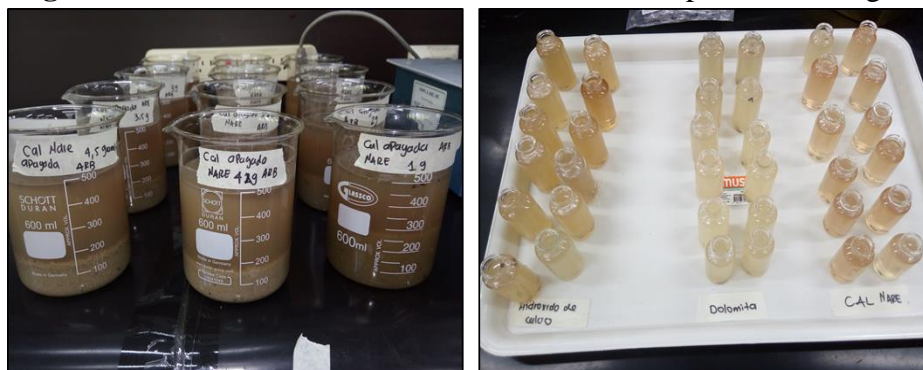


Fuente: Autora

#### 7.4 Tratamiento primario del agua residual

Con el fin de adecuar el pH del agua residual a los rangos de acción del coagulante se realizaron pruebas de tratamiento con tres tipos de cal: Hidróxido de calcio, Cal Nare y Cal Dolomita. Las tres cales utilizadas se evaluaron a cinco concentraciones diferentes (1000, 2000, 3000, 4000 y 5000 ppm) y una concentración de DQO en el agua residual del café de 12500 ppm (concentración mínima del agua residual proveniente del beneficio ecológico). La selección de la cal apropiada para realizar el acondicionamiento del agua se realizó con base en las variables pH y absorbancia, tal como se observa en la Figura 10.

**Figura 9.** Evaluación de tres cales en el tratamiento primario del agua residual



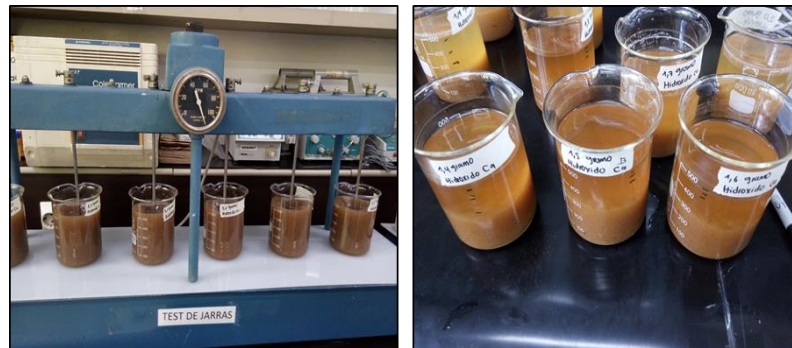
Fuente: Autora

Después de seleccionar la cal apropiada para el tratamiento primario del agua residual a 12500 ppm, se procedió a evaluar 10 dosis de cal en dos tipos de agua: 12500 ppm de DQO (concentración mínima del agua residual proveniente del beneficio ecológico) y 25000 ppm de DQO (concentración máxima del agua residual proveniente del beneficio ecológico del café en tanques de fermentación), realizando 3 repeticiones para cada dosis.

La selección de dosis se realizó utilizando el test de jarras, muestras de agua residual de 500 m, agitación a 120 rpm durante 5 minutos, agitación a 60 rpm durante 25 minutos y sedimentación 24 horas, en la Figura 11 se presentan los procedimientos realizados.

Una vez terminado el proceso se midió la absorbancia y el pH a cada una de las muestras y se seleccionó la dosis óptima de cal. Al agua residual tratada con la dosis óptima de cal se le determino la DQO y los SST, con el fin de determinar el porcentaje de remoción obtenido en el tratamiento primario.

**Figura 10.** Tratamiento primario del agua residual con hidróxido de calcio



Fuente: Autora

### 7.5. Evaluación del efecto coagulante de las 4 plantas seleccionadas

Se realizó la caracterización del agua residual del beneficio del café antes de someterla a tratamiento, en los parámetros pH, DQO (ppm), Sólidos Suspendedos Totales-SST (ppm),

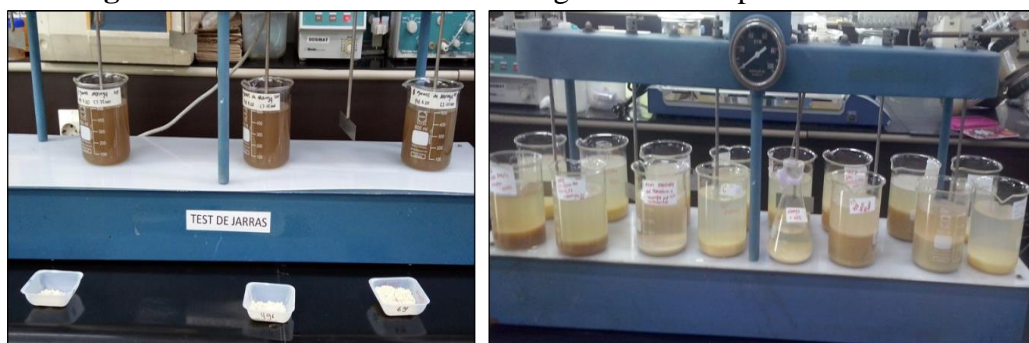
turbiedad y absorbancia (por ser los parámetros control en la normativa ambiental vigente para el recurso hídrico).

Para la evaluación del efecto coagulante de los extractos, se utilizó el test de jarras, para ello se aplicó el extracto en 500 ml de agua residual (unidad experimental) y se realizó una agitación a 120 rpm durante 5 minutos, seguidamente se agitó a 60 rpm durante 25 minutos y finalmente se dejó sedimentar por 24 horas (Figura 12). Después de este proceso se determinó la absorbancia (por espectrofotometría), a una muestra de 25 ml. Por cada dosis evaluada, se tuvieron 10 unidades experimentales. Se utilizó como testigo un coagulante químico (sulfato de aluminio) a las mismas condiciones del extracto natural utilizado.

Para el caso de Moringa y Jatropha se realizaron pruebas de coagulación con la semilla seca molida y con la semilla después de realizar la extracción de grasas y proteína y se evaluó el efecto coagulante sobre las aguas residuales a pH original, después del tratamiento primario y adicionando la fuente de calcio, mezclando por 3 minutos a 120 rpm, y posteriormente agregando el coagulante natural (para Moringa) y adicionando la fuente de calcio y seguidamente el coagulante natural (para Jatropha).

Para el caso del Balso y Astromelio se realizaron pruebas de coagulación con el mucílago fresco y con el extracto seco y molido. Se evaluó el efecto sobre el agua residual a pH original y adicionando al tiempo la fuente de calcio y el extracto.

**Figura 11.** Evaluación del efecto coagulante de las plantas evaluadas.



Fuente: Autora

Una vez realizadas las pruebas para cada planta seleccionada y en 5 dosis diferentes se seleccionó la dosis óptima para cada extracto y el procedimiento adecuado para su aplicación, esta selección se realizó teniendo en cuenta la absorbancia (variable de interés). Finalmente, a las muestras de agua tratada que presentaron los menores valores de absorbancia se les realizó una caracterización fisicoquímica en los siguientes parámetros: DQO (ppm) , SST (ppm) , turbiedad (NTU), Sólidos Sedimentables (mL/L), Color (UnPt-Co), Fósforo total (ppm), Nitrógeno total Kjeldahl (ppm) y Grasas y aceites (ppm).

#### **7.6. Metodologías utilizadas en las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas**

pH: Método potenciométrico, empleando como sensor un electrodo combinado Referencia InLab 413SG, acoplado a un instrumento de medición portátil (Modelo Seven Go Referencia SG2-FK, Mettler Toledo).

Turbiedad: Método absortométrico, de la HACH y el espectrofotómetro DR2000. (HACH, 1988).

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Se realizó por el método de reflujo cerrado, método colorimétrico desarrollado por la HACH y aprobado por la U.S.EPA (HACH, 1988),



Sólidos Suspendidos: Método gravimétrico (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

Fósforo y Fosfatos: Se utilizó el Método absortométrico del ácido ascórbico de la HACH (Aprobado por la U.S.EPA y adaptado del Standard Methods) y el espectrofotómetro DR6000.

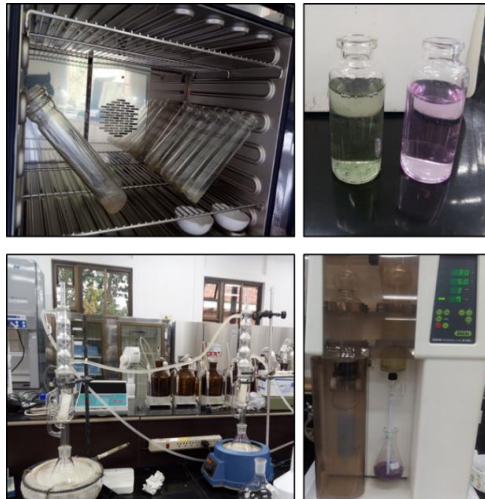
Nitrógeno: se determinaron por el método titulométrico semimicro-Kjeldahl (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

Nitratos: Se utilizó el método absortométrico de reducción con cadmio de la HACH y el espectrofotómetro DR6000. (HACH, 1988).

Grasas y aceites: Se utilizó el método de extracción soxhlet (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

En la Figura 13 se presentan las caracterizaciones fisicoquímicas realizadas.

**Figura 12.**Caracterizaciones fisicoquímicas realizadas



Fuente: Autora

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1. Selección de las especies a evaluar

De acuerdo a su presencia en zona cafetera y su capacidad coagulante, las cuatro especies vegetales seleccionadas fueron: Moringa (*Moringa oleifera*), Jatropha (*Jatropha curcas*), Astromelio (*Hibiscus rosa sinensis*), Balso (*Heliocarpus popayanesis*).

### 8.2. Caracterización de los extractos

Una vez realizada la extracción de los diferentes compuestos coagulantes se realizó la caracterización básica a cada uno de los extractos obtenidos, los valores encontrados se reportan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Valores promedio de la caracterización fisicoquímica de los extractos

Parámetro	Extractos de cada especie			
	Moringa	Jatropha	Astromelio	Balso
DQO (%bs)	23,13	23,74	23,78	16,20
pH (und)	6,16	6,31	6,04	5,89
Nitratos (%bs)	0,01	0,05	0,10	0,10
Fosfatos (%bs)	0,03	0,003	0,02	0,04
Nitrógeno (%bs)	16,0	2,60	1,30	1,50
Carbono (%bs)	55,3	54,70	45,90	47,10

En las caracterizaciones realizadas se encontró que la carga orgánica de los extractos oscilo entre 16,20 (Balso) y 23, 78% (Astromelio). Se evidenció el alto contenido de proteína en las semillas de Moringa con porcentajes de Nitrógeno del 16% comparada con las demás plantas, que tuvieron valores entre 2,6 y 1,3%. En cuanto al contenido de carbono este presentó valores entre 55,3 (Moringa) y 45,9 % (Balso). Para los fosfatos y nitratos se presentaron valores inferiores al 1% para las cuatro plantas evaluadas.

### 8.3. Tratamiento primario

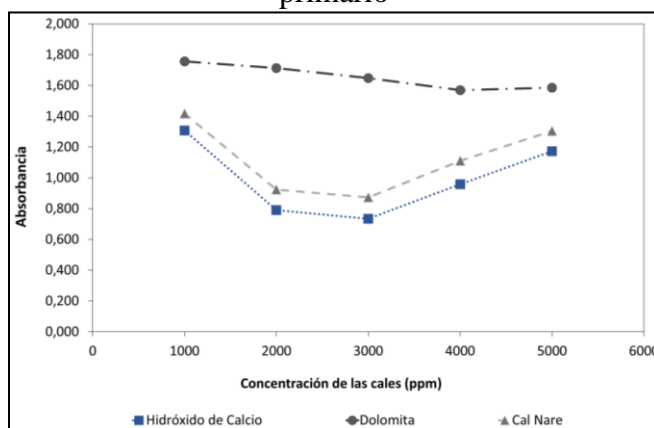
A continuación se presentan los resultados obtenidos en el tratamiento primario de las aguas residuales del beneficio del café utilizando tres tipos de cal (Hidróxido de calcio, Dolomita y Cal Nare). Para esta evaluación se utilizaron 5 dosis de cada una de las cales y se realizaron tres repeticiones para cada ensayo. En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación.

**Tabla 2.** Resultados del tratamiento primario utilizando fuentes de calcio

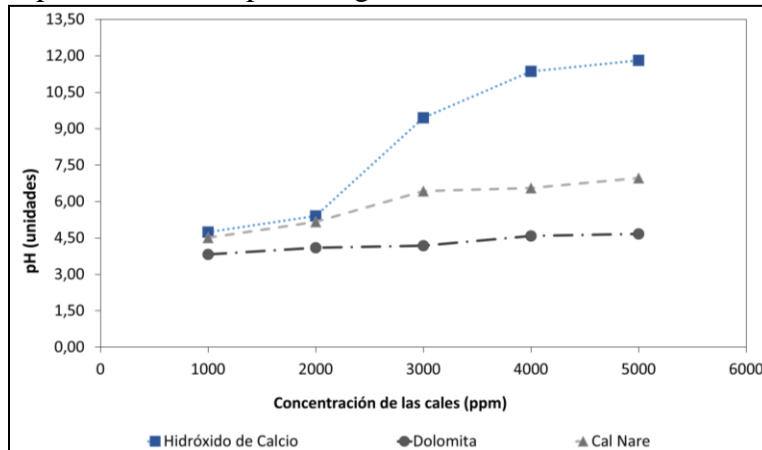
Concentración (ppm)	Valor	Hidróxido de Calcio		Dolomita		Cal Nare	
		Abs	pH (und)	Abs	pH (und)	Abs	pH (und)
1000	Promedio	1,308	4,74	1,757	3,83	1,418	4,51
	CV (%)	6,364	1,08	2,470	1,21	2,174	0,26
2000	Promedio	0,790	5,41	1,713	4,10	0,925	5,17
	CV (%)	1,966	0,21	4,908	1,15	4,815	1,87
3000	Promedio	0,735	9,45	1,648	4,18	0,873	6,43
	CV (%)	4,013	5,20	3,951	1,90	5,955	0,55
4000	Promedio	0,958	11,36	1,569	4,58	1,111	6,56
	CV (%)	3,055	3,39	3,228	0,33	1,399	1,50
5000	Promedio	1,173	11,82	1,586	4,67	1,305	6,97
	CV (%)	4,821	1,73	3,377	1,06	1,988	2,99

En las Gráficas 1 y 2 se presentan los comportamientos de las variables absorbancia y pH en el agua residual tratada

**Gráfica 1.** Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada en el tratamiento primario



**Gráfica 2.** Comportamiento del pH del agua residual tratada en el tratamiento primario.



De acuerdo a los resultados obtenidos, los mejores resultados se presentaron cuando se utilizó Hidróxido de calcio, ya que se lograron los valores de pH en los rangos requeridos para la aplicación de los coagulantes naturales y del testigo químico (4,51 a 11,82) a las menores dosis y los valores de absorbancia obtenidos fueron los menores (1,308 a 0,735).

La Cal Dolomita presentó valores de absorbancia altos (entre 1,757 y 1,569) y valores de pH entre 3,83 y 4,67 los cuales no se encuentran en el rango de actuación de los coagulantes a evaluar, por lo tanto no es viable para el tratamiento primario.

En cuanto a la Cal Nare los valores de absorbancia fueron menores a los de la Cal Dolomita (1,418 a 0,873) pero inferiores a los obtenidos con Cal Agrícola y el pH presento valores entre 4,51 y 6,97, a pesar de que a un pH de 6,97 se pueden aplicar los coagulantes se requiere de una cantidad muy alta de Cal y la absorbancia del agua obtenida es alta comparada con el Hidróxido de Calcio a las mismas condiciones.

Teniendo en cuenta lo anterior se seleccionó el Hidróxido de calcio para realizar el tratamiento primario del agua residual del café. Una vez seleccionado se realizaron las

evaluaciones a 10 dosis diferentes de hidróxido con el fin de encontrar la dosis óptima que se debe aplicar en el tratamiento primario.

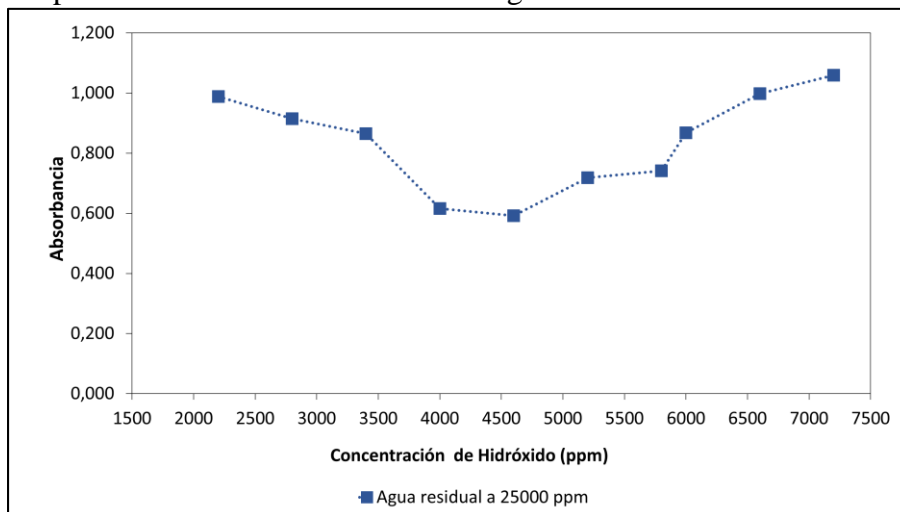
En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación del hidróxido de calcio en agua residual del beneficio de café a una concentración de 12500 ppm como DQO.

**Tabla 3.** Resultado del tratamiento primario utilizando diferentes dosis de hidróxido de calcio

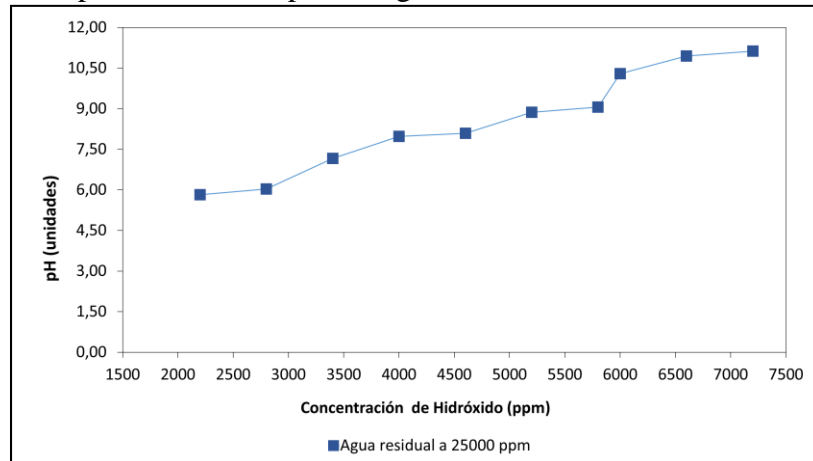
Dosis Hidróxido de calcio(ppm)	Absorbancia		pH (unidades)	
	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
2000	0,677	2,15	8,45	1,20
2200	0,645	5,31	9,02	0,46
2400	0,587	2,55	9,40	1,71
2600	0,579	3,43	9,75	0,43
2800	0,549	5,29	9,86	0,51
3000	0,577	4,40	9,98	0,47
3200	0,573	1,98	10,05	0,38
3400	0,571	1,23	10,94	0,37
3600	0,576	1,76	11,51	0,48
4000	0,638	1,46	11,75	0,21

En las Gráficas 3 y 4 se presenta el comportamiento de la absorbancia y el pH en las evaluaciones realizadas con agua residual a una concentración de 12500 ppm.

**Gráfica 3.** Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada con hidróxido de calcio.



**Gráfica 4.** Comportamiento del pH del agua residual tratada con hidróxido de calcio.



De acuerdo a los resultados obtenidos las dosis óptimas para el hidróxido de calcio se encuentran entre 2000 y 3600 ppm, ya que a estas dosis se logra llegar a valores de pH que se encuentran en el rango de acción de los coagulantes (9,75 a 9,98) y se obtiene las menores absorbancias (0,549 a 0,579). En la figura 14 se observa el aspecto del agua residual del beneficio del café después del tratamiento primario.

Al agua residual tratada se le realizó la determinación de la carga orgánica (medida como DQO) con el fin de determinar el porcentaje de remoción obtenido utilizando el hidróxido de calcio en el tratamiento primario. En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos

**Tabla 4.** Resultados de la caracterización fisicoquímica del agua residual proveniente del tratamiento primario

Dosis de Hidróxido de Calcio (ppm)	DQO promedio (ppm)	CV (%)	Remoción promedio (%)
2800	6416	1,02560373	48,7
3000	6370	1,92507825	49,0
3200	6377	1,77725865	49,0

Los valores promedio corresponden a 5 repeticiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que el tratamiento primario con hidróxido de calcio permitió disminuir la concentración de DQO de las aguas residuales del café en

valores medios cercanos al 50%, en la Figura 14 se observa el aspecto de agua residual después de realizar el tratamiento primario.

**Figura 13.** Aspecto del agua después del tratamiento primario con hidróxido de calcio



Fuente: Autora

Finalmente se realizaron los ensayos de tratamiento primario utilizando agua residual a una concentración de 25000 ppm como DQO, en la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en esta evaluación.

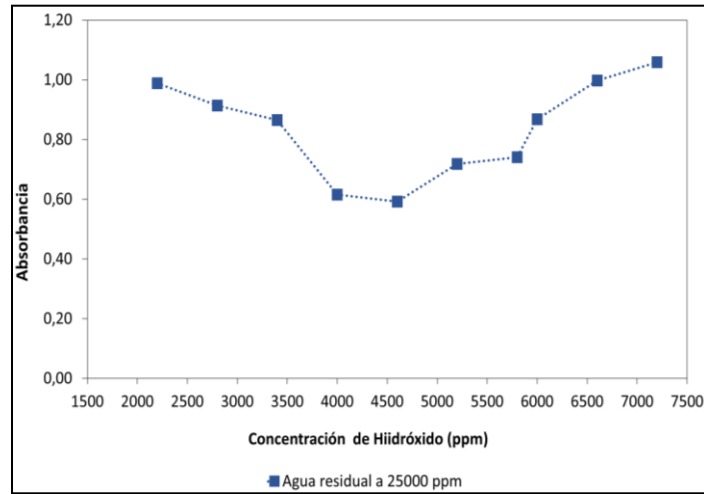
**Tabla 5.** Resultado del tratamiento primario en aguas residuales del beneficio a una concentración de 25000 ppm

Dosis Hidróxido de calcio(ppm)	Absorbancia		pH (unidades)	
	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
2200	0,989	0,80	5,82	1,84
2800	0,914	0,77	6,03	0,33
3400	0,865	0,72	7,16	0,50
4000	0,616	0,50	7,98	0,63
4600	0,592	1,95	8,09	0,89
5200	0,718	0,78	8,87	1,11
5800	0,741	1,22	9,06	0,72
6000	0,868	1,44	10,29	0,45
6600	0,998	0,96	10,94	0,56
7200	1,059	1,68	11,13	0,78

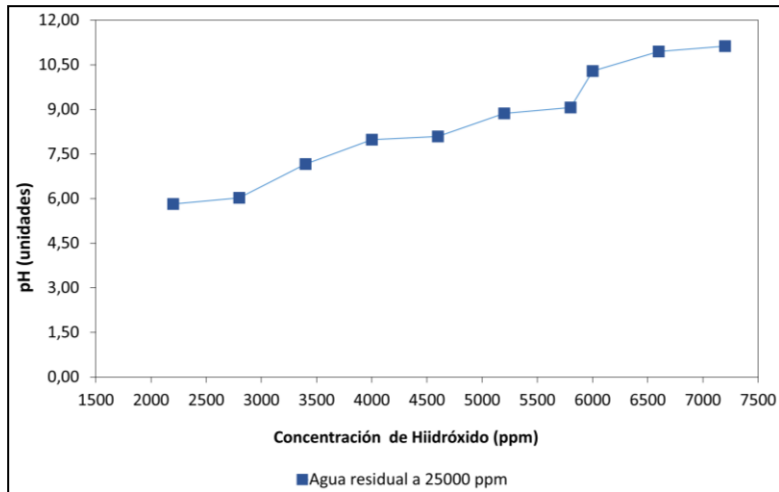
Los valores promedio corresponden a 5 repeticiones

En las gráficas 5 y 6 se observa el comportamiento de la absorbancia y el pH del agua residual tratada

**Gráfica 5.** Comportamiento de la absorbancia en el tratamiento primario utilizando aguas residuales a una concentración de 25000 ppm



**Gráfica 6.** Comportamiento del pH en el tratamiento primario utilizando aguas residuales a una concentración de 25000 ppm



De acuerdo a los resultados obtenidos la dosis óptima de hidróxido de calcio en el tratamiento primario del agua residual del café a una concentración de 25000 ppm esta entre 4000 y 4600 ya que se lograron los menores valores de absorbancia (0,616 y 0,592 respectivamente) y el pH final del agua residual está en el rango de acción de los coagulantes a evaluar.



## **8.4. Pruebas de coagulación**

Después de realizar el tratamiento primario al agua residual del beneficio de café se procedió a evaluar el efecto coagulante de las diferentes plantas seleccionadas, a continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas.

### **8.4.1. Moringa Oleifera**

Tal como se describió anteriormente en el caso de Moringa oleifera se realizaron pruebas de coagulación con la planta seca y molida y con la planta después de realizar la extracción de las grasas y la proteína y se evaluó su efecto sobre aguas residuales del beneficio del café a pH original, después del tratamiento primario y adicionando la fuente de calcio seguida del coagulante natural

#### **8.4.1.1. Polvo de Moringa sin extracción de grasas y proteína**

Inicialmente los ensayos se realizaron a una concentración de 12500 ppm como DQO con el fin de determinar la metodología apropiada para realizar la aplicación y así poder realizar la experimentación a una concentración más alta (25000 ppm como DQO).

##### Agua residual pH original

La primera prueba se realizó aplicando el polvo de Moringa sobre al agua residual del beneficio del café a pH original, en la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación.

**Tabla 6.** Prueba de Coagulación con Moringa a pH original

Dosis	pH (unidades)		Absorbancia		Turbiedad (FTU)	
	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
Moringa (ppm)						
2000	4,12	3,60	1,623	3,17	1028	2,73
4000	3,89	2,89	1,793	2,71	1031	3,82
6000	3,59	1,53	2,027	4,44	1101	6,12

Datos promedio de 10 réplicas

De acuerdo a los resultados que se observan en la tabla 5 no hay un efecto del polvo de la semilla de Moringa sobre el agua residual a pH original, lo anterior dado que el pH del agua residual del café es ácido y de acuerdo a lo reportado por estudios anteriores el rango de acción de la Moringa se encuentra en valores de pH entre 6 y 9. (Okuda, 2001)

#### Agua residual proveniente del tratamiento primario

La segunda evaluación se realizó al agua residual proveniente del tratamiento primario (después de la aplicación de hidróxido de calcio y la separación de los lodos), en la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en esta etapa.

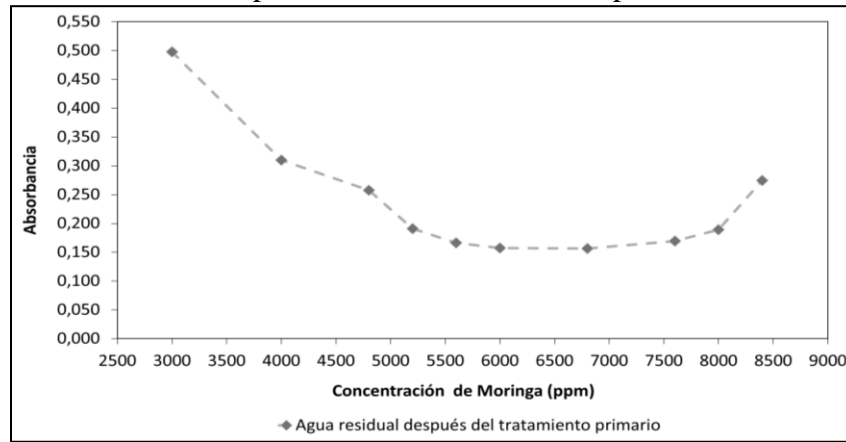
**Tabla 7.** Pruebas de coagulación con el agua residual proveniente del tratamiento primario

Dosis	pH (unidades)		Absorbancia		Turbiedad (FTU)	
	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
Moringa (ppm)						
3000	6,18	0,43	0,498	1,93	172	4,44
4000	5,86	0,87	0,310	3,97	152	6,93
4800	5,51	0,76	0,258	2,96	144	5,67
5200	5,47	0,62	0,191	1,48	113	6,27
5600	5,14	1,18	0,166	3,08	93	7,90
6000	4,94	0,65	0,157	2,22	70	6,43
6800	4,91	0,67	0,156	2,41	69	6,38
7600	4,76	0,57	0,169	1,72	77	4,40
8000	4,57	1,21	0,189	2,63	99	5,90
8400	4,44	0,85	0,275	1,91	137	7,50

Datos promedio de 10 réplicas

En la Gráfica 7 se presenta el comportamiento promedio de la absorbancia para las 10 dosis evaluadas.

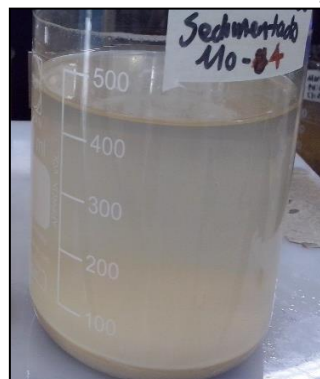
**Gráfica 7.** Comportamiento de la absorbancia en las pruebas de coagulación utilizando agua residual proveniente del tratamiento primario



En las evaluaciones realizadas se encontró que los menores valores de absorbancia se presentaron cuando se utilizó una dosis de Moringa entre 6000 y 6800 ppm llegando a unos valores de absorbancia de 0,157 y 0,156 y a valores de pH de 4,94 y 4,91.

En la figura 15 se observa el aspecto del agua residual tratada a las condiciones óptimas.

**Figura 14.** Aspecto del agua residual proveniente del tratamiento primario tratada posteriormente con Moringa



Fuente: Autora

### Mezcla de hidróxido de calcio y Moringa

La tercera evaluación se realizó aplicando el hidróxido de calcio y la Moringa en una sola etapa. El procedimiento consistió en aplicar primero el hidróxido de calcio y agitar durante 3 minutos a 120 rpm y posteriormente agregar el polvo de Moringa, lo anterior con el fin de acondicionar el agua a un rango de pH adecuado para el coagulante. Las pruebas se realizaron a dos dosis diferentes de hidróxido de calcio, tomando como referencia los resultados encontrados en las pruebas del tratamiento primario.

En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de la mezcla de hidróxido de calcio y Moringa

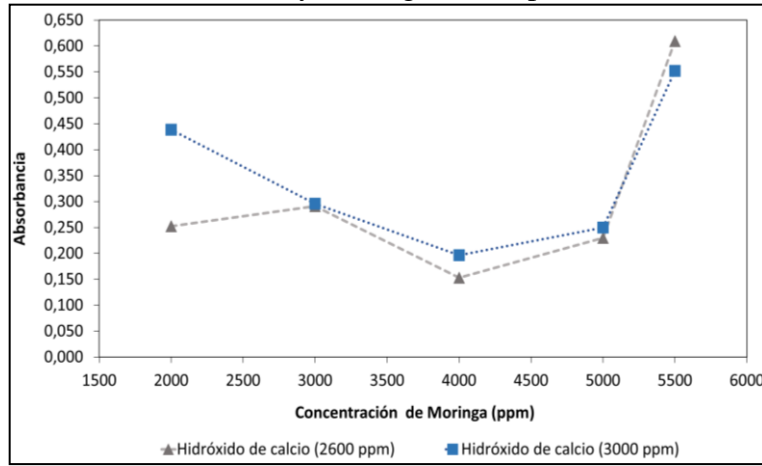
En las gráficas 8 y 9 se presentan el comportamiento del pH y la absorbancia de las muestras de agua tratadas a las dos dosis de hidróxido y para las 5 dosis de Moringa.

**Tabla 8.** Resultados de la evaluación utilizando la mezcla de hidróxido de calcio y Moringa

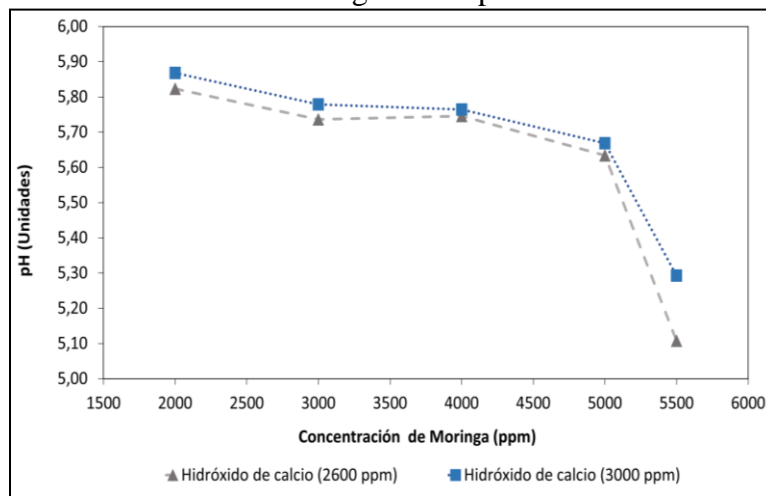
Dosis		pH (unidades)		Absorbancia		Turbiedad (FTU)	
Hidróxido de calcio (ppm)	Moringa (ppm)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
2600	2000	5,82	0,95	0,252	2,88	109	8,16
	3000	5,74	1,45	0,291	2,65	113	8,62
	4000	5,75	1,27	0,153	6,56	49	6,20
	5000	5,63	0,92	0,230	5,37	80	6,59
	5500	5,11	1,47	0,610	2,29	235	4,83
3000	2000	5,87	1,55	0,439	4,85	164	4,07
	3000	5,78	0,71	0,296	2,09	142	3,84
	4000	5,76	1,24	0,197	1,77	69	5,090
	5000	5,67	1,51	0,250	4,65	135	3,28
	5500	5,29	3,54	0,552	3,95	162	6,42

Datos promedio de 10 réplicas

**Gráfica 8.** Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada adicionando hidróxido de calcio y Moringa al tiempo



**Gráfica 9.** Comportamiento del pH del agua residual tratada adicionando hidróxido de calcio y Moringa al tiempo

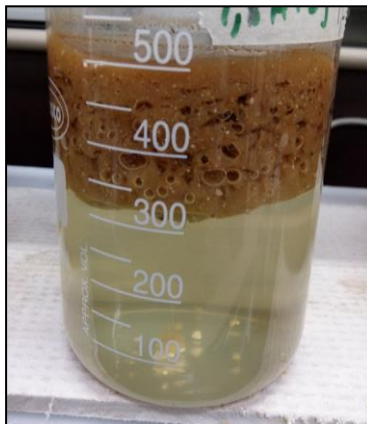


De acuerdo a los resultados presentados anteriormente, cuando se utilizó una dosis de hidróxido de calcio de 2600 ppm los menores valores de absorbancia se presentaron a una concentración de Moringa de 4000 ppm (0,153 en promedio) el pH del agua residual tratada con esta dosis fue de 5,75 en promedio.

En el caso del hidróxido de calcio a una concentración de 3000 ppm los menores valores de absorbancia también se obtuvieron a una dosis de Moringa de 4000 ppm, con valores de absorbancia y pH de 0,197 y 5,76 respectivamente.

Teniendo en cuenta los resultados presentados, cuando se utiliza una mezcla de hidróxido de calcio con la semilla de Moringa seca y molida, para el tratamiento de aguas residuales del beneficio del café a una concentración de 12500 ppm como DQO, las dosis óptimas para el tratamiento son 2600 ppm de Hidróxido de calcio y 4000 ppm de Moringa. En la figura 16 se observa el aspecto del agua residual tratada a las condiciones óptimas.

**Figura 15.** Aspecto del agua residual tratada adicionando hidróxido de calcio y Moringa



Fuente: Autora

#### 8.4.1.2. Evaluación de Moringa después de la extracción de grasas y proteína

La cuarta evaluación consistió en utilizar el extracto líquido de Moringa después de realizar los procedimientos de extracción de grasas y proteínas, para ello se utilizó el agua residual proveniente del tratamiento primario y el agua original realizando la mezcla del extracto con el hidróxido de calcio a una concentración de 2600 ppm.

No se realizó la evaluación a pH original ya que de acuerdo a los resultados obtenidos en las etapas anteriores y a lo reportado en la literatura el polvo de Moringa no actúa a pH ácido.

En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos en esta etapa.

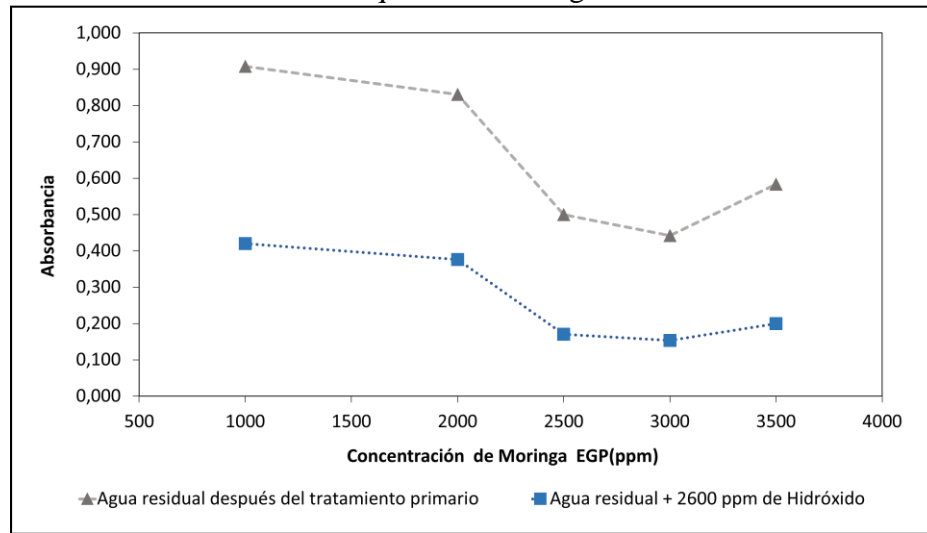
**Tabla 9.** Resultados de la evaluación utilizando el extracto líquido de Moringa.

Tipo de agua	Dosis	pH (unidades)		Absorbancia		Turbiedad (FTU)	
	Moringa (ppm)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
Agua residual después del tratamiento primario	1000	5,69	0,37	0,908	1,07	300	3,86
	2000	5,54	0,45	0,831	1,60	259	10,29
	2500	5,39	0,28	0,499	0,68	206	4,22
	3000	5,20	0,42	0,442	0,87	154	5,19
	3500	4,97	0,84	0,584	0,46	260	6,87
Agua residual + 2600 ppm de Hidróxido de calcio	1000	5,52	0,36	0,420	0,34	164	5,35
	2000	5,31	0,34	0,376	0,95	109	3,74
	2500	5,18	0,53	0,170	0,79	96	3,24
	3000	4,99	0,49	0,153	1,51	69	7,87
	3500	4,53	0,72	0,199	0,83	108	5,61

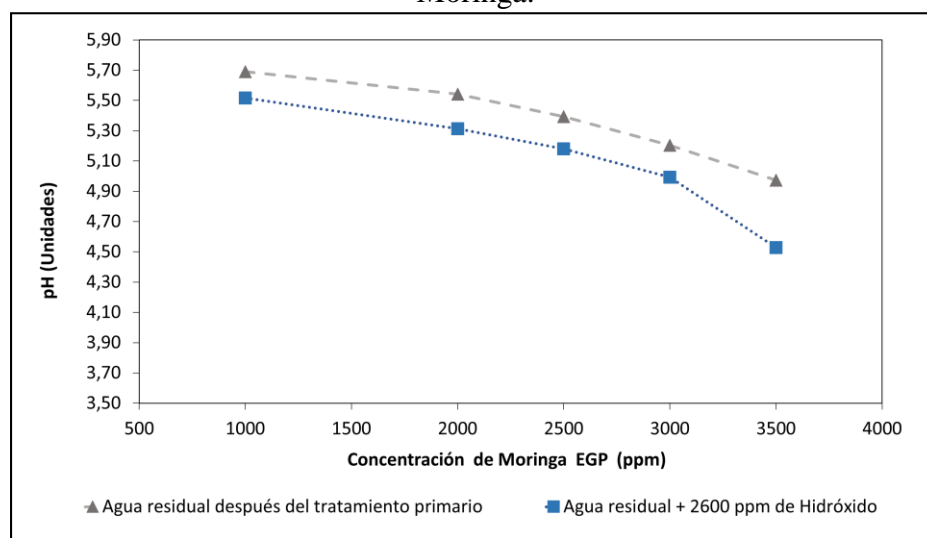
Datos promedio de 10 réplicas

En las gráficas 10 y 11 se presenta el comportamiento de la absorbancia y el pH cuando se realizó la aplicación del extracto líquido sin grasa sobre el agua residual proveniente del tratamiento primario y sobre al agua original adicionando hidróxido de calcio y extracto líquido al tiempo.

**Gráfica 10.** Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada utilizando el extracto líquido de Moringa



**Gráfica 11.** Comportamiento del pH del agua residual tratada utilizando el extracto líquido de Moringa.



De acuerdo a los resultados presentados anteriormente, cuando se utiliza el extracto de Moringa sobre el agua residual proveniente del tratamiento primario las menores absorbancias se presentaron a una dosis de 3000 ppm (0,442 en promedio) sin embargo el aspecto del agua sigue siendo turbio (164 NTU en promedio)



Cuando se aplica el extracto líquido mezclado con el hidróxido de calcio los menores valores de absorbancia (0,153 en promedio) se presentaron a una dosis de 3000 ppm, con valores promedio de pH y turbiedad de 4,99 y 69 FTU respectivamente. Teniendo en cuenta lo anterior es más apropiado aplicar el extracto líquido mezclado con el hidróxido de calcio que aplicarlo sobre el agua residual proveniente del tratamiento primario.

Después de evaluar las diferentes metodologías de aplicación del coagulante obtenido de la semilla de Moringa, se encontró que la metodología apropiada es la adición de hidróxido de calcio (a una dosis de 2600 ppm), agitación y seguidamente la adición de la semilla seca y molida de Moringa, ya que para estas condiciones se presentaron los menores valores de absorbancia y turbiedad. La efectividad del tratamiento se explica por el acondicionamiento del pH (a valores óptimos para el funcionamiento del coagulante), y al posible efecto floculante del material inerte, aún en suspensión, que acompaña al hidróxido de calcio utilizado.

#### 8.4.1.3. Agua residual a una concentración de 25000 ppm como DQO

Para el agua residual a una concentración de 25000 ppm (concentración máxima del agua residual proveniente del beneficio ecológico del café en tanques de fermentación) se realizó la evaluación adicionando hidróxido de calcio, agitando y seguidamente agregando la semilla seca y molida de Moringa, dado que fue la metodología que presento los mejores resultados cuando se realizó la evaluación a una concentración de 12500 ppm.

Se evaluaron dos dosis de hidróxido de calcio, tomando como referencia los resultados del tratamiento primario, y se evaluaron 5 dosis de Moringa, realizando 10 repeticiones para cada una.

En la tabla 10 presentan los resultados obtenidos para las evaluaciones realizadas al agua a una concentración de 25000 ppm de DQO.

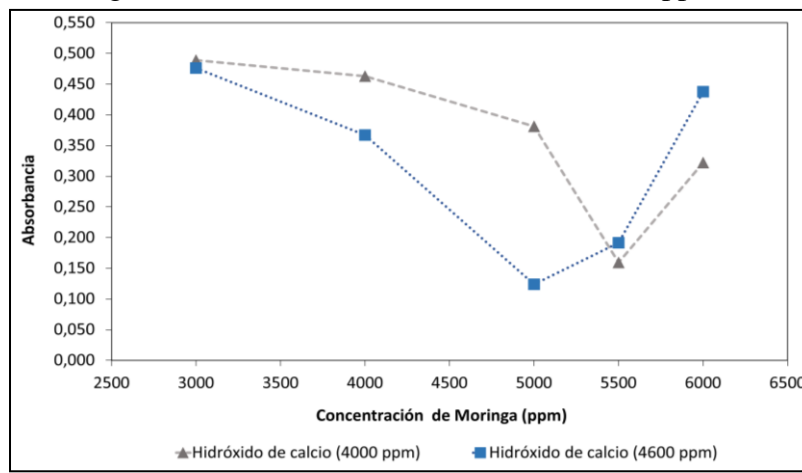
**Tabla 10.** Resultados de la evaluación utilizando agua residual a 25000 ppm

Dosis		pH (unidades)		Absorbancia		Turbiedad (FTU)	
Hidróxido de calcio (ppm)	Moringa (ppm)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
4000	3000	5,79	0,78	0,489	1,88	165	4,06
	4000	5,68	0,82	0,463	1,62	160	3,39
	5000	5,65	0,81	0,381	4,03	137	3,03
	5500	5,50	1,15	0,160	3,04	69	7,79
	6000	5,29	0,73	0,322	2,84	87	3,34
4600	3000	5,90	0,80	0,476	1,14	187	2,23
	4000	5,84	0,83	0,367	2,41	158	2,83
	5000	5,68	0,82	0,124	3,54	67	5,86
	5500	5,60	0,75	0,192	2,76	91	6,33
	6000	5,41	1,46	0,437	5,67	197	5,38

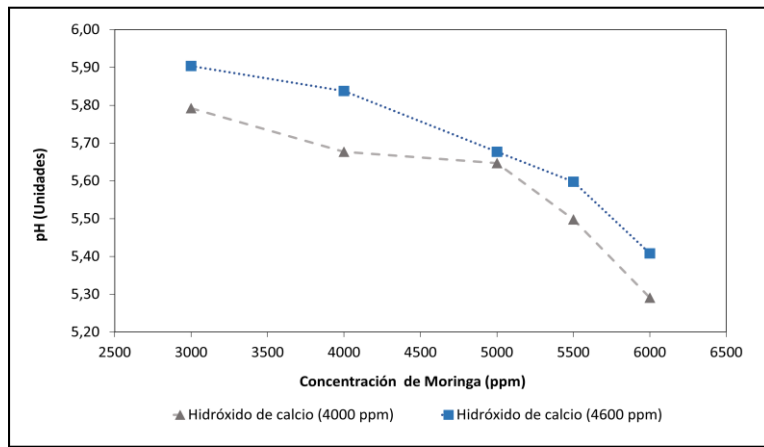
Datos promedio de 10 réplicas

En las gráficas 12 y 13 se presenta el comportamiento del pH y el absorbancia en la evaluación realizada con agua residual a 25000 ppm.

**Gráfica 12.** Comportamiento de la absorbancia en las pruebas de coagulación con Moringa en agua residual a una concentración de 25000 ppm.



**Gráfica 13.** Comportamiento del pH en las pruebas de coagulación con Moringa en agua residual a una concentración de 25000 ppm.



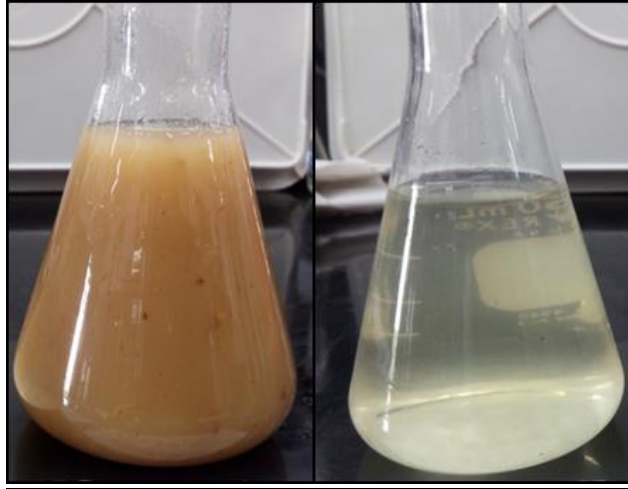
Según los resultados presentados cuando se utilizó hidróxido de calcio a una dosis de 4000 ppm la dosis óptima de Moringa fue de 5500 ppm con valores promedio de absorbancia y pH del agua residual tratada de 0,160 y 5,50 respectivamente.

Cuando se utilizó hidróxido de calcio a una dosis de 4600 ppm la dosis óptima de Moringa fue de 5000 ppm con valores promedio de absorbancia y pH del agua residual tratada de 0,124 y 5,68 respectivamente.

De acuerdo a lo anterior cuando se utiliza agua residual del beneficio del café a una concentración de 25000 ppm como DQO, la dosis óptima para el tratamiento son 4600 ppm de hidróxido de calcio y 5000 ppm de semilla de Moringa seca y molida.

En la Figura 17 se observa el aspecto del agua después de realizar el tratamiento con la mezcla de hidróxido de calcio y Moringa a las dosis óptimas.

**Figura 16.** Aspecto del agua residual a 25000 ppm antes y después del tratamiento.



Fuente: Autora

#### **8.4.2. Jatropha Curcas**

Para el caso de Jatropha se evaluó únicamente el extracto líquido después de la extracción de la proteína, ya que cuando se realizaron las pruebas con el polvo seco y molido este no se diluyó en el agua residual por lo tanto no se presentó ningún cambio en las características del agua. Las evaluaciones se realizaron sobre aguas residuales del beneficio del café a dos concentraciones (12500 y 25000 ppm como DQO), se evaluó el efecto sobre el agua residual al pH original y con la adición de hidróxido de calcio a dos concentraciones diferentes, tomando como referencia los resultados del tratamiento primario, en este caso se agregó el hidróxido de calcio y seguidamente el extracto de Jatropha dado que el efecto coagulante de la Jatropha se presenta a pH ácidos.

En tabla 11 se presentan los resultados obtenidos en las evaluaciones de coagulación para el agua residual a una concentración de 12500 ppm.

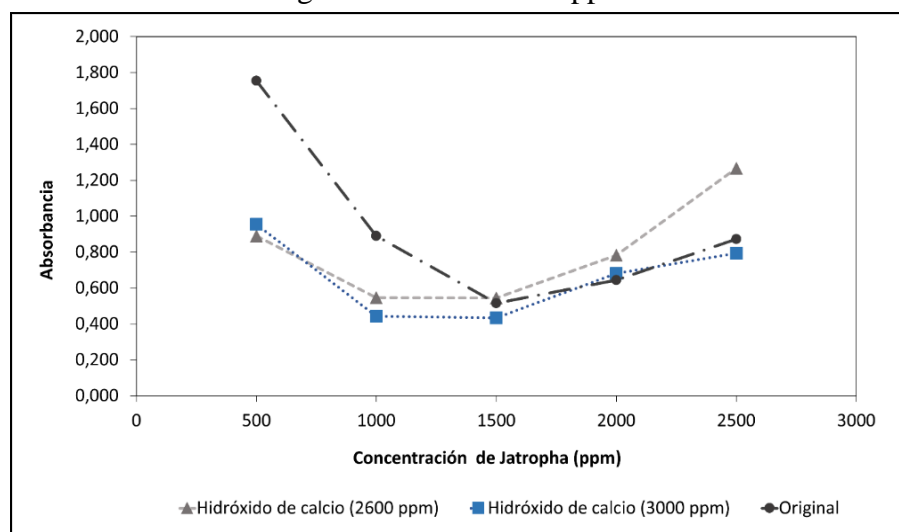
**Tabla 11.** Resultados de la evaluación del efecto coagulante de Jatropha sobre agua residual a 12500 ppm

Dosis		pH (unidades)		Absorbancia		Turbiedad (FTU)	
Hidróxido de calcio (ppm)	Jatropha (ppm)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
Original	500	3,58	2,23	1,755	4,20	698	10,95
	1000	3,59	1,16	0,891	1,15	225	6,70
	1500	3,55	1,93	0,516	2,65	129	3,04
	2000	3,43	1,59	0,644	1,29	147	4,08
	2500	3,29	0,57	0,873	0,69	284	7,26
2600	500	5,70	0,74	0,891	1,81	284	5,74
	1000	5,49	0,26	0,546	0,85	154	7,96
	1500	5,30	0,28	0,545	1,35	151	7,77
	2000	4,65	1,46	0,783	0,96	238	2,04
	2500	3,42	1,00	1,267	0,69	726	1,44
3000	500	5,89	0,82	0,955	1,63	314	2,93
	1000	5,58	0,64	0,444	1,69	135	3,18
	1500	5,47	0,63	0,434	1,77	135	2,14
	2000	5,13	1,11	0,681	0,52	168	1,20
	2500	4,96	1,33	0,794	0,68	178	2,38

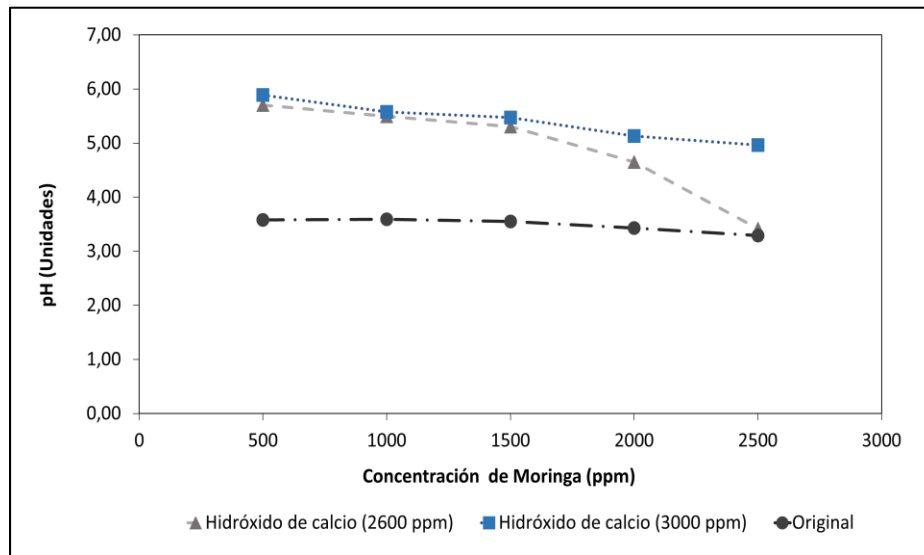
Datos promedio de 10 réplicas

En las gráficas 14 y 15 se presenta el comportamiento del pH y la absorbancia para las evaluaciones realizadas con el extracto de Jatropha a las tres condiciones evaluadas.

**Gráfica 14.** Comportamiento de la absorbancia en las pruebas de coagulación con Jatropha en agua residual a 12500 ppm.



**Gráfica 15.** Comportamiento del pH en las pruebas de coagulación con *Jatropha* en agua residual a 12500 ppm.



Según los resultados presentados anteriormente cuando se aplica el extracto de *Jatropha*, al agua residual a pH original, los menores valores de absorbancia (0,516 en promedio) se obtuvieron a una dosis de 1500 ppm, con un valor promedio de pH del agua residual tratada de 3,55.

Cuando se aplica el extracto de *Jatropha* al tiempo con hidróxido de calcio, a una dosis de hidróxido 2600 ppm, los menores valores promedio de absorbancia (0,546 y 0,545) se obtuvieron a una dosis de *Jatropha* entre 1000 y 1500 ppm, con valores promedio del pH en el agua residual tratada de 5,49 y 5,30 respectivamente.

En la evaluación utilizando hidróxido de calcio a 3000 ppm se observó que los menores valores promedio de absorbancia (0,444 y 0,434) también se obtienen a una dosis de *Jatropha* entre 1000 y 1500, con valores de pH del agua residual tratada de 5,58 y 5,47 respectivamente.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, es más apropiado aplicar el extracto de *Jatropha* en una mezcla con hidróxido de calcio, lo anterior dado el posible efecto floculante del material inerte, aún en suspensión, que acompaña al hidróxido de calcio utilizado, el cual ejerce un efecto floculante sobre el agua residual y hace que precipiten fácilmente los sólidos, además de ello se forma un precipitado más denso que facilita su separación (figura 18)

En la figura 18 se observa el aspecto del agua residual tratada con *Jatropha* tanto para pH original como para la mezcla con hidróxido de calcio.

**Figura 17.** Aspecto del agua residual tratada con el extracto de *Jatropha*



Fuente: Autora

Finalmente se evaluó el efecto del extracto de *Jatropha* sobre agua residual del beneficio del café a una concentración de 25000 ppm a las mismas condiciones descritas anteriormente para el agua residual a 12500 ppm. En la tabla 12 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas.

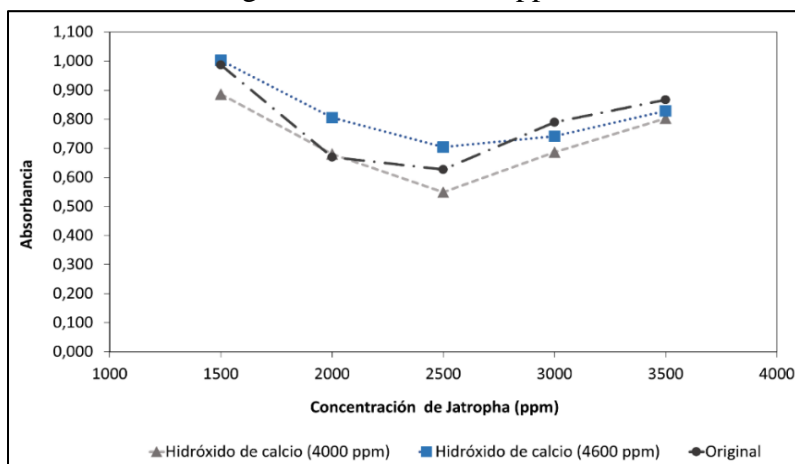
**Tabla 12.** Resultados de la evaluación del efecto coagulante de *Jatropha* sobre agua residual

Dosis		pH (unidades)		Absorbancia		Turbiedad (FTU)	
Hidróxido de calcio (ppm)	<i>Jatropha</i> (ppm)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
Original	1500	3,57	0,70	0,987	0,24	291	0,97
	2000	3,50	0,40	0,670	0,69	193	1,60
	2500	3,41	0,57	0,628	0,46	186	1,29
	3000	3,37	0,61	0,790	0,22	223	4,46
	3500	3,28	0,60	0,867	0,55	249	2,01
4000	1500	5,39	0,29	0,887	0,50	183	2,63
	2000	5,19	0,33	0,680	0,56	147	3,41
	2500	5,11	0,40	0,549	0,53	110	8,43
	3000	4,89	0,43	0,687	0,63	127	4,56
	3500	4,63	0,89	0,803	1,28	205	2,86
4600	1500	5,59	0,60	1,003	0,66	280	2,36
	2000	5,38	0,68	0,805	0,52	261	3,46
	2500	5,25	0,66	0,704	1,14	198	3,52
	3000	4,88	1,12	0,741	0,37	209	2,37
	3500	4,51	1,17	0,829	0,40	234	2,53

Datos promedio de 10 réplicas

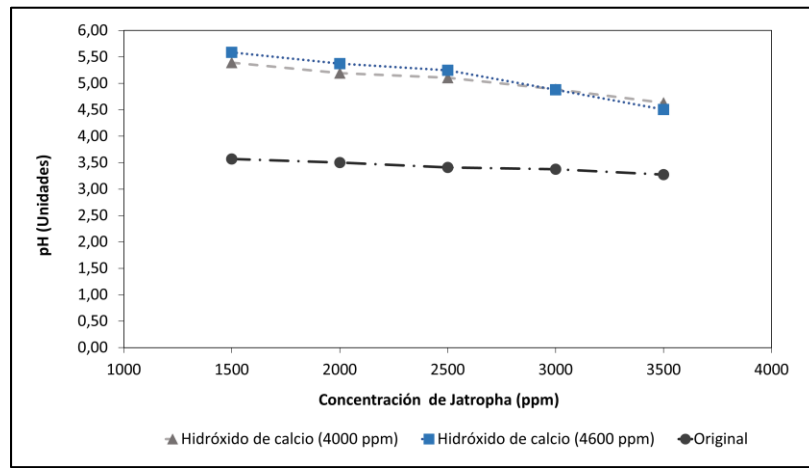
En las gráficas 16 y 17 se presenta el comportamiento de la absorbancia y el pH para las evaluaciones realizadas con agua residual a 25000 ppm

**Gráfica 16.** Comportamiento de la absorbancia en las pruebas de coagulación con *Jatropha* en agua residual a 25000 ppm.





**Gráfica 17.** Comportamiento del pH en las pruebas de coagulación con *Jatropha* en agua residual a 25000 ppm.



De acuerdo a los resultados obtenidos cuando se utiliza *Jatropha* para el tratamiento de aguas residual a una concentración de 25000 ppm a su pH original, los menores valores de absorbancia se presentaron a una dosis de 2500 ppm (0,628 en promedio) con un pH promedio del agua residual tratada de 3,41.

Cuando se utiliza la mezcla de *Jatropha* con hidróxido de calcio a una concentración de 4000 ppm, la dosis de *Jatropha* a la cual se presentan los menores valores de absorbancia (0,549 en promedio) es de 2500 ppm, con un valor final promedio de pH de 5,11. Para la mezcla utilizando 4600 ppm los menores valores de absorbancia (0,704 en promedio) se presentaron a la misma concentración que para 4000 ppm.

### 8.4.3 Balso y Astromelio

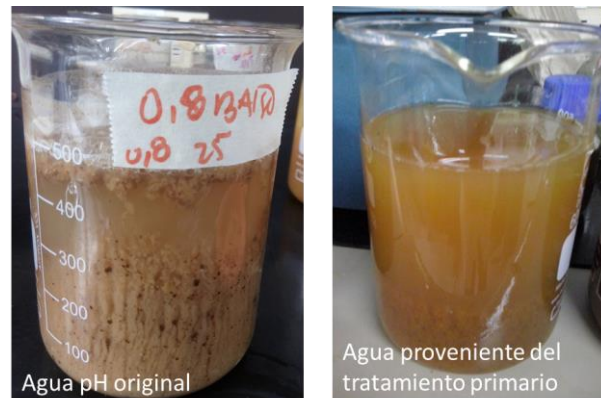
Para el caso del Balso y el Astromelio inicialmente se realizaron las pruebas con el mucílago extraído en fresco, se observó que este no se incorporaba en el agua residual por tener una densidad menor y por lo tanto permanecía flotante en la parte superior del agua a tratar. Se utilizaron varias estrategias con el propósito de facilitar la mezcla del mucílago con el agua residual, entre ellas la agitación profunda y la adición de un dispositivo que empujara hacia abajo el mucílago, sin obtener resultados positivos con ninguna de las estrategias evaluadas.

Otra alternativa evaluada fue la de la aplicación del extracto seco y molido después de la extracción con etanol. Para las evaluaciones de las dos plantas se utilizó agua residual con su pH original, agua proveniente del tratamiento primario y la mezcla del extracto con hidróxido de calcio. Sin embargo al realizar las evaluaciones no se observó un efecto coagulante de estas plantas sobre el agua residual a ninguna condición (no se presentó separación) y a medida que se aumentaba la dosis el agua se volvía más turbia (Figura 19), lo anterior se explica dado que, como se presentó en la Tabla 1 (Valores promedio de la caracterización fisicoquímica de los extractos), los valores de carga orgánica medida como DQO para el balso y el astromelio tuvieron valores de 16, 20 y 23,78 % respectivamente, por lo tanto al no precipitar este material se disuelve en el agua ocasionando que aumente la carga orgánica en lugar de disminuir ocasionando que el agua presente un aspecto más turbio.

Dado que este tipo de plantas se han utilizado por muchos años en los procesos de clarificación de la panela para eliminar la cachaza y que este es un proceso que se realiza a temperaturas (75 y 120 °C), se realizó un ensayo calentando el agua residual lo cual no es

costo efectivo para el tratamiento de las aguas residual del café, pero en este caso se quería determinar su factibilidad técnica, como material coagulante, dado que la densidad del agua residual se disminuye al calentar esto permitió la mezcla y la precipitación.

**Figura 18.** Aspecto del agua residual después de la aplicación de balso y astromelio



Fuente: Autora

#### 8.4.4. Ensayos de coagulación con sulfato de aluminio (Testigo)

Para las evaluaciones con sulfato de aluminio se utilizó agua residual proveniente del tratamiento primario y adicionando el hidróxido de calcio y el coagulante químico al tiempo, lo anterior con el fin de comparar los resultados obtenidos con el coagulante químico con los obtenidos con los coagulantes naturales. No se evaluó a pH a original dado que el rango de pH al cual actúa el coagulante está entre 5 y 7,5. En total se evaluaron 10 dosis con tres replicas para el agua residual a 12500 ppm y a 25000 ppm. La metodología de aplicación del sulfato de aluminio cuando se adicionó hidróxido de calcio fue la misma que se utilizó con Moringa.

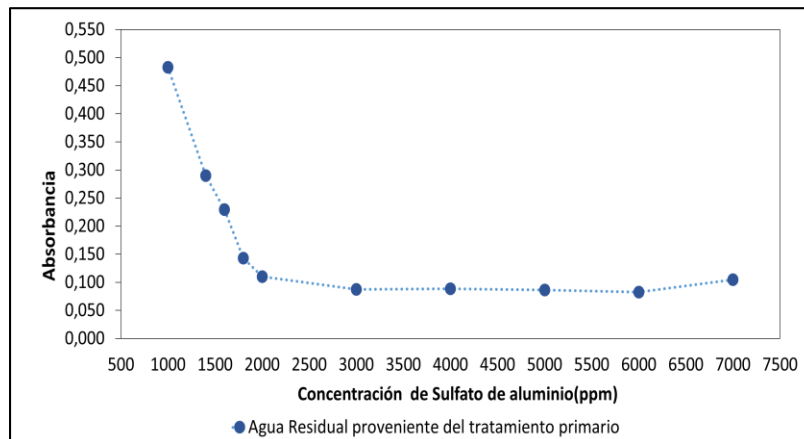
En la tabla 13 se presentan los resultados obtenidos para la evaluación realizada con el agua residual proveniente del tratamiento primario.

**Tabla 13.** Resultados de las pruebas de coagulación con sulfato de aluminio en agua proveniente del tratamiento primario

Dosis de sulfato de aluminio (ppm)	pH (unidades)		Absorbancia	
	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
1000	6,12	0,41	0,483	1,00
1400	5,79	0,36	0,290	1,40
1600	5,60	0,63	0,230	3,81
1800	5,45	0,87	0,143	2,85
2000	5,30	1,42	0,110	3,80
3000	5,06	0,91	0,087	4,30
4000	4,96	1,15	0,088	1,76
5000	4,59	1,53	0,086	1,82
6000	4,33	0,87	0,083	3,05
7000	4,21	0,41	0,105	1,90

En la gráfica 18 se presenta el comportamiento de la absorbancia para las pruebas de coagulación realizadas con sulfato de aluminio en agua proveniente del tratamiento primario.

**Gráfica 18.** Comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada con sulfato de aluminio



En las evaluaciones realizadas con sulfato de aluminio se encontró que los menores valores de absorbancia (0,083 y 0,087 en promedio) se encuentran para una dosis entre 3000 y 6000 ppm, con unos valores promedio de pH del agua residual tratada entre 4,96 y 4,21.

En la tabla 14 se presentan los resultados obtenidos para las pruebas de coagulación utilizando la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio

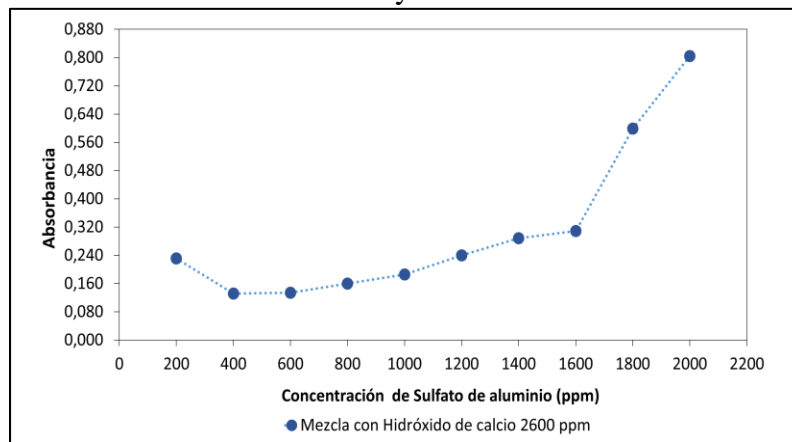
**Tabla 14.** Resultados del tratamiento del agua residual con la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio

Dosis de sulfato de aluminio (ppm)	pH (unidades)		Absorbancia	
	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
200	6,11	0,189	0,232	5,43
400	5,91	0,352	0,132	3,88
600	5,83	0,343	0,134	3,82
800	5,71	0,267	0,160	1,57
1000	5,64	0,716	0,186	2,76
1200	5,54	0,926	0,240	3,70
1400	5,49	0,278	0,288	1,06
1600	5,47	0,692	0,309	0,49
1800	5,36	1,213	0,599	2,95
2000	5,24	1,151	0,804	1,20

Datos promedio de 10 réplicas

En la gráfica 19 se observa el comportamiento de la absorbancia del agua residual tratada con la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio.

**Gráfica 19.** Comportamiento de la absorbancia en el agua residual tratada con la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio.



De acuerdo a los resultados obtenidos las menores absorbancias (entre 0,132 y 0,160) se presentan cuando se utilizó una dosis entre 400 y 800 ppm de sulfato de aluminio, mezclada con hidróxido de calcio en una concentración de 2600 ppm.

De igual forma que con los coagulantes naturales con el sulfato de aluminio se observó el efecto floculante del material inerte, aún en suspensión, que acompaña al hidróxido de calcio utilizado, el cual optimiza el tratamiento ya que se disminuyen las dosis utilizada en aproximadamente la quinta parte comparadas con las utilizadas para el agua residual proveniente del tratamiento primario.

Finalmente se realizó la evaluación con agua residual a una concentración de 25000 ppm, utilizando la mezcla de sulfato de aluminio con hidróxido de calcio a una concentración de 4600 ppm, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 15.

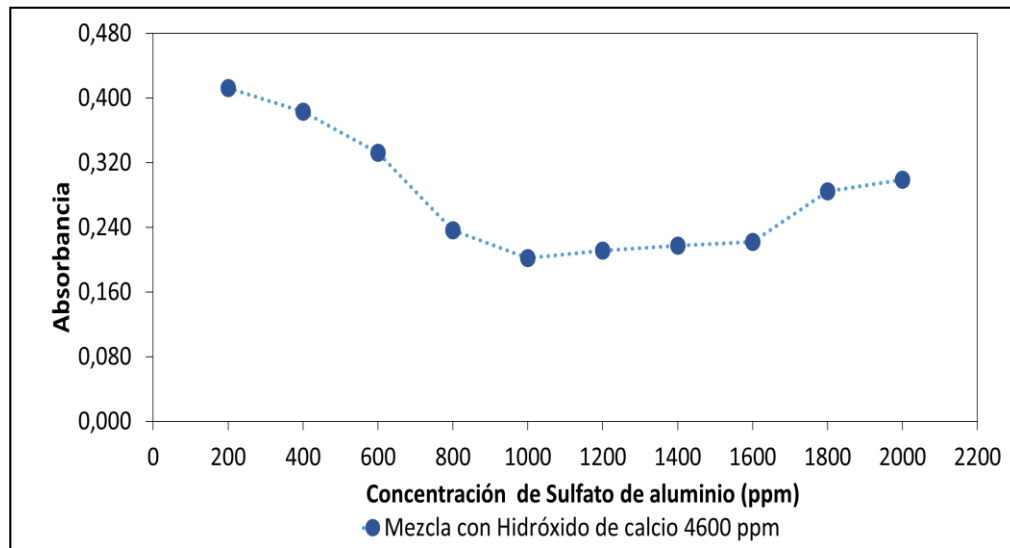
**Tabla 15.** Resultados del tratamiento del agua residual con la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio (Agua original a 25000 ppm)

Dosis de sulfato de aluminio (ppm)	pH (unidades)		Absorbancia	
	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
200	6,77	0,17	0,413	1,65
400	6,43	0,24	0,383	3,11
600	6,12	0,49	0,332	3,25
800	5,89	0,35	0,237	2,75
1000	5,67	0,44	0,202	1,78
1200	5,61	0,37	0,212	1,44
1400	5,49	1,73	0,217	0,96
1600	5,43	0,83	0,222	1,19
1800	5,33	0,47	0,285	3,56
2000	5,25	1,06	0,299	2,41

Datos promedio de 10 réplicas

En la gráfica 20 se presenta el comportamiento de la absorbancia para la evaluación realizada con agua residual a una concentración de 25000 ppm.

**Gráfica 20.** Comportamiento de la absorbancia en el agua residual tratada con la mezcla de hidróxido de calcio y sulfato de aluminio. (Agua residual a 25000 ppm)



De acuerdo a los resultados presentados las dosis óptimas del coagulante químico para el agua residual a una concentración de 25000 ppm se encuentran entre 1000 y 1500 ppm, ya que en este rango se presentaron los menores valores de absorbancia (0,217 a 0,202).

### 8.5. Caracterización fisicoquímica del agua residual tratada

Una vez realizadas las pruebas de coagulación con cada una de las plantas y en las diferentes metodologías evaluadas, se seleccionó la dosis óptima de coagulante de acuerdo a los valores de absorbancia del agua residual tratada y seguidamente se caracterizó esta, en los parámetros: Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Suspendedos Totales (a la dosis óptima y a una dosis por encima y otra por debajo de la óptima). Las caracterizaciones anteriores también se realizaron al testigo (agua residual tratada con sulfato de aluminio), al agua residual proveniente del tratamiento primario y al agua residual sin tratamiento.

En las tablas 16 a 18 se presentan los resultados de las caracterizaciones fisicoquímicas del agua residual.

**Tabla 16.** Caracterizaciones iniciales del agua residual sin realizar los tratamientos de coagulación.

<b>Tipo de agua</b>	<b>DQO (ppm)</b>	<b>SST (ppm)</b>
Agua residual del café a la concentración mínima proveniente del beneficio ecológico (ARB1)	12500	2300
Agua residual del café a la concentración máxima proveniente del beneficio ecológico del café en tanques de fermentación	25000	5200
Agua residual proveniente del tratamiento primario	6000	200

Datos promedio de 10 réplicas

**Tabla 17.** Caracterizaciones fisicoquímicas del agua residual tratada con las dosis óptimas para cada una de las evaluaciones realizadas. (ARB1).

<b>Tipo de tratamiento</b>	<b>Dosis (ppm)</b>	<b>DQO (ppm)</b>		<b>SST (ppm)</b>		<b>Remoción promedio (%)</b>	
		<b>Promedio</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Promedio</b>	<b>CV (%)</b>	<b>DQO</b>	<b>SST</b>
Agua residual del tratamiento primario*+ Moringa	6000	3595	6,83	152	5,51	40,1	24,0
	6800	3708	5,99	163	1,92	38,2	18,5
	7600	3571	5,72	155	5,49	40,5	22,5
Hidróxido calcio 2600 + Moringa	3000	3541	6,43	207	4,47	71,7	91,0
	4000	3501	4,16	151	4,16	72,0	93,5
	5000	4660	3,21	200	3,90	62,7	91,3
Hidróxido calcio 3000 + Moringa	3000	3457	3,97	279	5,12	72,3	87,9
	4000	4462	6,68	209	6,05	64,3	90,9
	5000	5624	2,76	390	5,77	55,0	83,0
Agua residual a pH original + Jatropha	1000	4037	2,70	726	2,83	67,7	68,4
	1500	2761	1,34	311	7,07	77,9	86,5
	2000	2752	1,20	449	4,48	78,0	80,5
Hidróxido calcio 2600 + Jatropha	1000	2705	6,94	288	5,48	78,4	87,5
	1500	2704	4,89	281	6,15	78,4	87,8
	2000	3738	3,55	655	3,95	70,1	71,5
Hidróxido calcio 3000 + Jatropha	1000	2597	5,11	269	3,85	79,2	88,3
	1500	2654	3,77	263	4,35	78,8	88,6
	2000	3710	5,20	523	3,84	70,3	77,3
Testigo (sulfato de aluminio)	ATP	2530	4,40	154	2,00	57,8	23,0
	Con Hidróxido	3520	3,40	157	4,20	71,9	93,2

Datos promedio de 10 réplicas. Moringa: Semilla seca y molida. ATP: Agua proveniente del tratamiento primario

\*Agua residual a una concentración de 6000 ya que proviene del tratamiento primario.



**Tabla 18.** Caracterizaciones fisicoquímicas del agua residual tratada con las dosis óptimas para cada una de las evaluaciones realizadas. (ARB2).

Tipo de tratamiento	Dosis(ppm)	DQO (ppm)		SST (ppm)		Remoción promedio (%)	
		Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	DQO	SST
Hidróxido calcio 4000 + Moringa	5000	5995	2,42	900	1,21	76,0	82,7
	5500	6272	5,07	459	5,07	74,9	91,2
	6000	7877	1,00	727	1,00	68,5	86,0
Hidróxido calcio 4600 + Moringa	4000	5680	3,20	706	4,36	77,3	86,4
	5000	5773	2,47	407	5,48	76,9	92,2
	5500	7580	4,05	525	6,25	69,7	89,9
Agua residual a pH original + Jatropha	2000	8371	3,93	752	4,43	66,5	85,5
	2500	8572	3,87	788	5,15	65,7	84,9
	3000	8366	3,88	760	2,96	66,5	85,4
Hidróxido calcio 4000 + Jatropha	2000	7815	3,71	640	6,13	68,7	87,7
	2500	7332	4,12	642	5,89	70,7	87,7
	3000	7461	4,07	628	6,00	70,2	87,9
Hidróxido calcio 4600 + Jatropha	2000	7864	2,70	668	4,17	68,5	87,2
	2500	7866	3,21	659	5,08	68,5	87,3
	3000	7813	2,11	676	3,82	68,7	87,0
Testigo (sulfato de aluminio)	400	5503	2,1	598	5,4	77,9	88,5

Datos promedio de 10 réplicas. Moringa: Semilla seca y molida

### Resultados de tratamiento con agua residual a 12500 ppm de DQO

De acuerdo a los resultados de las caracterizaciones realizadas, se encontró que cuando se utilizó la semilla de Moringa seca y molida para tratar el agua proveniente del tratamiento primario se lograron remociones en la DQO entre 40,1 y 38,2% y en los SST entre 24,0 y 18,5 %, presentándose las mayores remociones cuando se utilizó una dosis de Moringa de 6000 ppm. En cuanto al coagulante químico utilizado para tratar el agua proveniente del tratamiento primario se obtuvo una remoción promedio de la DQO de un 57,8% y de los sólidos suspendidos del 23,0%.

Cuando se utilizó el polvo de Moringa mezclado con el hidróxido de calcio para tratar las aguas residuales del beneficio del café a una concentración de 12500 ppm, las remociones promedio estuvieron entre 72,3 y 55,0% para la DQO y entre 93,5 y 83,0 % para los SST. Las remociones mayores se presentaron para la mezcla de hidróxido de calcio a una dosis de 2600 ppm con el extracto de Moringa (dosis de 4000 ppm), esta condición también fue seleccionada como óptima de acuerdo a los valores de absorbancia.

Según los resultados de la caracterización cuando se realizó el tratamiento al agua residual a una concentración de 12500 ppm y a pH original, realizado con el extracto de Jatropha, se obtuvieron remociones promedio en la DQO entre 78,0 y 67,7 % y en los sólidos suspendidos entre 86,5 y 68,4%.

Cuando se realizó la mezcla de Jatropha con hidróxido de calcio para tratar las aguas residuales a una concentración de 12500 ppm, se obtuvieron remociones promedio de la DQO entre 79,2 y 70,1% y de Sólidos Suspendidos entre 71,5 y 88,6%, presentándose las remociones más altas cuando se utilizó una mezcla de hidróxido de calcio a una dosis de 3000 ppm con el extracto de Jatropha a una dosis de 1500 ppm.

#### Resultados de tratamiento con agua residual a 25000 ppm de DQO

En cuanto al tratamiento del agua residual del beneficio del café a una concentración de 25000 ppm de DQO utilizando la semilla de Moringa mezclada con hidróxido de calcio las remociones de la DQO estuvieron entre 77,3 y 68,5 % y para los SST entre 92,2 y 82,7 %, siendo la dosis con la remoción más alta la conformada por 4000 ppm de Moringa mezclada con 4600 ppm de hidróxido de calcio, condición que fue seleccionada previamente como óptima de acuerdo a los valores de la absorbancia.

Para el tratamiento del agua residual a pH original, con el extracto de Jatropha se presentaron remociones de DQO promedio entre 65,7 y 66,5% y de SST entre 85,4 y 84,9%.

Finalmente, cuando se realizó el tratamiento del agua residual a 25000 ppm con la mezcla de hidróxido de calcio y el extracto de Jatropha se obtuvieron remociones promedio para la DQO entre 70,7 y 68,5% y para los SST entre 87,0 y 87,9%.

Las remociones promedio encontradas para el testigo (coagulante químico mezclado con el hidróxido de calcio) en el tratamiento del agua residual a 25000 ppm de DQO fueron de 77,9% para la DQO y 88,2% para los SST.

### 8.5.1. Análisis estadístico de los resultados obtenidos

Se realizó un análisis de varianza con una confiabilidad del 95% para las variables de interés porcentaje de remoción de DQO y porcentaje de remoción de SST, para los tratamientos con menor absorbancia. En el anexo 1 se presentan los resultados obtenidos.

En las tablas 19 a 24 se presenta un resumen del análisis.

**Tabla 19.** Tratamientos evaluados para el agua residual a 12500 ppm

<b>Tratamiento</b>	
T1	Testigo (sulfato de aluminio)
T2	Moringa (4000 ppm)+Hidróxido de calcio (2600 ppm)
T3	Moringa (4000 ppm)+Hidróxido de calcio (3000 ppm)
T4	Agua residual a pH original +Jatropha (1500 ppm)
T5	Jatropha (1500 ppm)+Hidróxido de calcio (2600 ppm)
T6	Jatropha (1500 ppm)+Hidróxido de calcio (3000 ppm)

**Tabla 20.** Tratamientos evaluados para el agua residual a 25000 ppm

<b>Tratamiento</b>	
T1	Testigo (sulfato de aluminio)
T2	Moringa (5500ppm)+Hidróxido de calcio (4000ppm)
T3	Moringa (5000 ppm)+Hidróxido de calcio (4600 ppm)
T4	Agua residual a pH original +Jatropha (2500 ppm)
T5	Jatropha (2500 ppm)+Hidróxido de calcio (4000 ppm)
T6	Jatropha (2500 ppm)+Hidróxido de calcio (4600ppm)

**Tabla 21.** Resultados Análisis de varianza para la remoción de DQO a una concentración inicial del agua residual de 12500 ppm

<b>Grupo Tukey</b>	<b>Remoción de DQO Promedio (%)</b>	<b>Tratamiento</b>
A	78,77	T6
A	78,37	T5
A	77,91	T4
B	71,99	T2
B	71,91	T1
C	64,30	T3

**Tabla 22.** Resultados Análisis de varianza para la remoción de SST a una concentración inicial del agua residual de 12500 ppm

<b>Grupo Tukey</b>	<b>Remoción de SST Promedio (%)</b>	<b>Tratamiento</b>
A	93,46	T2
A	93,16	T1
B	90,91	T3
C	88,55	T6
C	87,80	T5
D	86,46	T4

**Tabla 23.** Resultados Análisis de varianza para la remoción de DQO a una concentración inicial del agua residual de 25000 ppm

<b>Grupo Tukey</b>	<b>Remoción de DQO Promedio (%)</b>	<b>Tratamiento</b>
A	77,93	T1
A	76,91	T3
B	74,91	T2
C	70,67	T5
D	68,54	T6
E	65,71	T4

**Tabla 24.** Resultados Análisis de varianza para la remoción de SST a una concentración inicial del agua residual de 25000 ppm

<b>Grupo Tukey</b>	<b>Remoción de SST Promedio (%)</b>	<b>Tratamiento</b>
A	92,17	T3
B	91,17	T2
C	88,50	T1
D	87,65	T5
D	87,33	T6
E	84,86	T4

Resultados de los tratamientos utilizando agua residual con una DQO de 12500 ppm

De acuerdo a los resultados obtenido en el análisis de varianza se observa que no se presentaron diferentes estadísticas, a un grado de confiabilidad del 95%, en la remoción de DQO para los tratamientos T6: Jatropha (1500 ppm)+Hidróxido de calcio (3000 ppm), remoción DQO 78,77%; T5: Jatropha (1500 ppm)+Hidróxido de calcio (2600 ppm), remoción DQO 78,37%; T4: Jatropha (1500 ppm), remoción DQO 77,91%, y los cuales

fueron estadísticamente diferentes del T2: Moringa (4000 ppm)+Hidróxido de calcio (2600 ppm) y del T1: Tratamiento Testigo con sulfato de aluminio; pero entre estos dos últimos tratamientos no se presentaron diferencias estadísticas a un grado de confiabilidad del 95%.

De esta forma se acepta la hipótesis de trabajo 1 que establecía: *“Al menos uno de los extractos naturales evaluados tiene la misma eficiencia de remoción de carga orgánica expresada como DQO que el coagulante químico (sulfato de aluminio) utilizado como testigo”*.

Considerando los resultados obtenidos se establece, como mejor tratamiento desde el punto de vista técnico y costo-efectivo (para el agua residual al 12500) el T6: Jatropha (1500 ppm)+Hidróxido de calcio (3000 ppm), que si bien no muestra diferencias estadísticamente significativas con T5 y T4, mostró menos valores de absorbancia que T5 y permite obtener un precipitado más denso que T4 permitiendo, su separación final.

De igual forma los resultados anteriores permiten aceptar la hipótesis de trabajo 2: *“Al menos uno de los coagulantes naturales evaluados reduce la carga orgánica expresada como DQO de las aguas residuales del café en un 50%”*. Dado que en los tratamientos con Moringa y con Jatropha se lograron reducciones de DQO entre 64,30 y 78,76%.

En cuanto a los resultados obtenidos para la remoción de SST, se observa que no se presentaron diferencias estadísticas significativas a un nivel de confiabilidad del 95% para los tratamientos T2: Moringa (4000 ppm)+Hidróxido de calcio (2600 ppm), remoción SST 93,46% y del T1: Tratamiento Testigo con sulfato de aluminio 93,16% y los cuales fueron estadísticamente diferentes a los demás tratamientos evaluados, remociones entre 86,46% (T4) y 90,91% (T3)

### Resultados de los tratamientos utilizando agua residual con una DQO de 25000ppm

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de varianza, para los tratamientos con agua residual a una concentración de 25000 ppm, se observa que no se presentaron diferencias estadísticas, a un grado de confiabilidad del 95%, en la remoción de DQO para los tratamientos T1: Tratamiento Testigo con sulfato de aluminio, remoción de DQO 77,93% y T3: Moringa (5000 ppm)+Hidróxido de calcio (4600 ppm), remoción de DQO 76,91%; los cuales fueron estadísticamente diferentes a los demás tratamientos evaluados. Por lo tanto se acepta la hipótesis de trabajo 1 que establecía: *“Al menos uno de los extractos naturales evaluados tiene la misma eficiencia de remoción de carga orgánica expresada como DQO que el coagulante químico (sulfato de aluminio) utilizado como testigo”*.

De igual forma los resultados obtenidos a 25000 ppm permiten aceptar la hipótesis de trabajo 2: *“Al menos uno de los coagulantes naturales evaluados reduce la carga orgánica expresada como DQO de las aguas residuales del café en un 50%”*. Dado que en los tratamientos con Moringa y con Jatropha se lograron reducciones de DQO entre 65,71 y 76,91%.

Considerando los resultados obtenidos se establece, como mejor tratamiento desde el punto de vista técnico y costo-efectivo (para el agua residual a 25000 ppm) el T3: Moringa (5000 ppm)+Hidróxido de calcio (4600 ppm) ya que con este se obtuvo la remoción más alta en términos de DQO (76,91%) y no presentó diferencias significativas estadísticamente con el tratamiento testigo.

En cuanto a los resultados obtenidos para la remoción de SST, se observa que se presentaron diferencias estadísticas, a un nivel de significancia del 95%, para los diferentes tratamientos evaluados, excepto entre T5: *Jatropha* (2500 ppm)+Hidróxido de calcio (4000 ppm), remoción SST 87,65% y T6: *Jatropha* (2500 ppm)+Hidróxido de calcio (4600 ppm), remoción SST 87,33%.

### 8.5.2. Caracterización fisicoquímica final al agua residual tratada

A los mejores tratamientos (seleccionados de acuerdo a las absorbancias y a la remoción de carga orgánica) se les realizó una caracterización en las siguientes variables: Grasas y aceites, Fósforo, Nitrógeno, Sólidos Sedimentables (SSED) y color a tres longitudes de onda, lo anterior con el fin de determinar el cumplimiento con la normativa ambiental vigente.

Los resultados de las caracterizaciones realizadas se presentan en las tablas 25 y 26

**Tabla 25.** Caracterización fisicoquímica final del agua residual tratada en los tratamientos más eficientes.

Tipo de tratamiento*	DQO inicial (ppm)	Grasas y aceites (ppm)	Fósforo (ppm)	Nitrógeno (ppm)	Color (unidades)		
					436nm	525nm	620nm
T2	12500	17,50	0,97	68,76	604	408	307
T3	25000	21,00	0,99	84,47	630	479	370
T4	12500	117,0	1,07	12,60	865	690	473
T6	12500	59,5	0,43	13,07	840	679	457
T4	25000	131,5	1,16	15,87	925	750	563
T5	25000	67,0	0,79	18,67	915	712	538

\*en las tablas 19 y 20 se encuentra a que dosis corresponde cada uno de los tratamientos.



**Tabla 26.** Caracterización fisicoquímica final del agua residual tratada en los tratamientos más eficientes.

Tipo de tratamiento*	DQO inicial (ppm)	pH (und)	DQO		SST		SSED (ml/l)
			Valor (ppm)	Remoción (%)	Valor (ppm)	Remoción (%)	
T2	12500	5,75	3501	72,0	151	93,5	1
T3	25000	5,68	5773	76,9	407	92,2	1
T4	12500	3,55	2761	77,9	311	86,5	7
T6	12500	5,47	2654	78,8	263	88,6	5
T4	25000	3,41	8572	65,7	788	84,9	7
T5	25000	5,11	7332	70,7	642	87,7	5

\*en las tablas 19 y 20 se encuentra a que dosis corresponde cada uno de los tratamientos

En las tablas 27 y 28 se presenta el cumplimiento del agua residual tratada con la normativa de vertimientos al agua y al suelo

**Tabla 27.** Cumplimiento del agua residual tratada con la normativa ambiental vigente para vertimientos a cuerpo de agua.

Tipo de tratamiento	DQO inicial (ppm)	pH (unidades)	DQO final (ppm)	SST (ppm)	Grasas y aceites (ppm)	SSED (ml/l)
Resolución 631 de 2015	N/A	5-9	3000	800	30	10
T2	12500	Cumple	No cumple	Cumple	Cumple	Cumple
T3	25000	Cumple	No cumple	Cumple	Cumple	Cumple
T4	12500	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	Cumple
T6	12500	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple	Cumple
T4	25000	No cumple	No cumple	Cumple	No cumple	Cumple
T5	25000	Cumple	No cumple	Cumple	No cumple	Cumple

De acuerdo a la caracterización fisicoquímica realizada se observa que todos los tratamientos caracterizados permiten cumplir con lo exigido en la normativa ambiental para SSED y SST. Los tratamientos T2 (12500 ppm) y T3 (25000 ppm) cumplen con todas las variables a excepción de la DQO (3501 ppm para T2 y 5773 para T3) y son los únicos tratamientos que cumplen con el valor límite máximo exigido en grasas y aceites en la normativa. En cuanto a T6 el único parámetro que se encuentra por fuera de la norma es el de grasas y aceites (valor de 59,5 ppm). El valor de DQO para los tratamiento 2 y 3 está

cercano al valor límite permisible en la normativa ambiental vigente, por lo que la implementación de un tratamiento terciario permitiría acondicionar el efluente para cumplir con los requerimientos de la norma y para el caso del tratamiento 6 una trampa de grasas incorporada después del tratamiento químico con los extractos naturales permitiría cumplir con los requisitos de norma.

**Tabla 28.** Cumplimiento del agua residual tratada con la normativa ambiental vigente para vertimientos al suelo

Tipo de tratamiento	DQO inicial (ppm)	pH (unidades)	DQO final (ppm)	SST (ppm)
Decreto 1594 de 1984	N/A	5 a 9	Remoción > 80%	Remoción > 80%
T2	12500	Cumple	No cumple	Cumple
T3	25000	Cumple	No cumple	Cumple
T4	12500	No cumple	No cumple	Cumple
T6	12500	Cumple	No cumple	Cumple
T4	25000	No cumple	No cumple	Cumple
T5	25000	Cumple	No cumple	Cumple

Comparando los resultados obtenidos con lo exigido por la normativa ambiental de vertimientos al suelo se observa que todos los tratamientos caracterizados cumplen con la remoción de SST y ninguno cumple con la remoción de DQO. No obstante los valores obtenidos están cerca a los porcentajes exigidos por la norma (entre 65,7 y 78,8 % -vs 80% de la norma). Por lo que un tratamiento terciario que complemente el tratamiento químico con el extracto natural sería necesario incorporar con el fin de poder cumplir con lo exigido en la normativa ambiental vigente.

## 8.6. Porcentajes de precipitado y material flotante en los tratamientos

Finalmente se realizó la medición del porcentaje de material separado como precipitado (Jatropha) o como material flotante (Moringa) (Figura 20) obtenidos para los mejores tratamientos, en la tabla 29 se presentan los resultados obtenidos

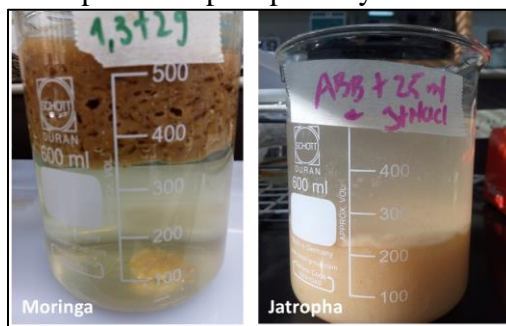
**Tabla 29.** Porcentajes de precipitados/flotantes para los tratamientos óptimos.

Tipo de tratamiento	DQO inicial (ppm)	Volumen Total	Volumen promedio (precipitado/flotante)	Porcentaje Promedio (%) (precipitado/flotante)
T2	12500	500	180 (CV=4,97%)	36,0
T3	25000	500	309 (CV=3,85%)	61,8
T4	12500	500	203 (CV=3,85%)	40,6
T6	12500	500	230 (CV=4,35%)	46,0
T4	25000	500	251 (CV=3,76%)	50,2
T5	25000	500	293(CV=2,67%)	58,6

Datos promedio de 10 réplicas

Los mayores porcentajes de material flotante se presentaron para el agua residual a 25000 ppm tratada con la mezcla de Moringa e hidróxido (61,8%) y los menores valores se presentaron cuando se realizó el tratamiento del agua residual a 12500 ppm con la mezcla de hidróxido y Moringa (36%).

**Figura 19.** Aspecto del precipitado y el material flotante



Fuente: Autora

## 9. CONCLUSIONES

1. Se identificaron de acuerdo a su presencia en zona cafetera y su capacidad coagulante, las especies vegetales Moringa (*Moringa oleifera*), Jatropha (*Jatropha curcas*), Astromelio (*Hibiscus rosa sinensis*), Balso (*Heliocarpus popayanesis*).
2. El hidróxido de calcio resultó ser el alcalinizante más adecuado para acondicionar el pH del agua residual en el rango de actuación de los coagulantes naturales. Se encontró que dosis entre 2000 y 3600 ppm para aguas residuales a 12 500 ppm de DQO y entre 4000 y 4600 ppm para aguas residuales a 25 000 ppm de DQO permitieron acondicionar el agua a los valores de pH requeridos para el uso de coagulantes y alcanzar valores de remoción de carga orgánica, expresada como DQO cercanos al 50%.
3. El procedimiento adecuado para el tratamiento de agua residual del café con el extracto de Moringa consiste en la adición de hidróxido de calcio, agitación y seguidamente la adición de la semilla seca y molida de Moringa, ya que para estas condiciones se presentan los menores valores de absorbancia y turbiedad. El coagulante extraído de la semilla de Moringa no tiene ningún efecto sobre las aguas residuales del café cuando estas se encuentran a pH ácido (pH original del agua residual del café).
4. El extracto de Jatropha se puede aplicar, con excelentes resultados, al agua residual del beneficio del café con pH ácido. Se encontró que para el tratamiento de las aguas residuales del café a una concentración de 12500 ppm como DQO y pH original, los menores valores de absorbancia (0,516 en promedio) se obtienen a una dosis de 1500 ppm del extracto de Jatropha, con un valor promedio de pH del agua residual tratada de 3,55.

5. Para el tratamiento del agua residual del beneficio del café a una concentración de 12500 ppm como DQO (valor mínimo de concentración proveniente del beneficio ecológico del café) se encontró para la mezcla de hidróxido de calcio con la semilla de Moringa seca y molida, que las dosis óptimas para el tratamiento son 2600 ppm de Hidróxido de calcio y 4000 ppm de Moringa. Para la mezcla de Jatropha con hidróxido de calcio, las condiciones óptimas se presentaron cuando se aplicó una dosis de 3000 ppm de hidróxido de calcio mezclado con Jatropha a una concentración de 1500 ppm.
6. Para el tratamiento del agua residual del beneficio del café a una concentración de 25000 ppm como DQO (valor máximo de concentración proveniente del beneficio ecológico del fruto utilizando tanques para el lavado del grano), la dosis óptima es 4600 ppm de hidróxido de calcio y 5000 ppm de semilla de Moringa seca y molida. Para la mezcla hidróxido y Jatropha la dosis óptima encontrada fue de 4000 ppm de hidróxido y 2500 ppm de Jatropha.
7. El uso de la mezcla de hidróxido de calcio con los extractos naturales hace más efectivos los tratamientos dado que permite acondicionar el pH (a valores óptimos para el funcionamiento del coagulante). Adicionalmente el material suspendido de la cal, aún sin disolver, favorece el proceso de floculación, logrando mayores eficiencias en el tratamiento de las aguas residuales.
8. El uso de los extractos de balsa y astromelio para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del de café no es viable desde el punto de vista costo - efectivo, ya que implicaría una etapa de calentamiento del agua residual del café que permita que el extracto se incorpore con el agua residual y ejerza su efecto.

9. Las dosis óptimas para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café cuando se utilizó sulfato de aluminio mezclado con hidróxido de calcio (a 2600 ppm) fueron entre 400 y 800 ppm para agua residual a 12500 ppm como DQO y entre 1000 y 1500 ppm para agua residual a 25000 ppm como DQO, con una dosis de hidróxido de calcio de 4600 ppm.
10. Cuando se utilizó la semilla de Moringa seca y molida para tratar el agua proveniente del tratamiento primario con hidróxido de calcio, se lograron remociones en la DQO entre 38,2 y 40,1% y en los SST entre 18,5 y 24,0%, presentándose las mayores remociones cuando se utilizó una dosis de Moringa de 6000 ppm.
11. Cuando se realizaron los diferentes tratamientos al agua residual del café a una concentración de 12500 ppm, la remoción de DQO para los tratamientos con Jatropha (1500 ppm) + Hidróxido de calcio (3000 ppm); Jatropha (1500 ppm) + Hidróxido de calcio (2600 ppm) y Jatropha (1500 ppm) no se presentaron diferencias estadísticas significativas, obteniéndose valores de remoción de DQO del 78,77%, 78,37% y 77,91% respectivamente.
12. El tratamiento del agua residual del beneficio del café a 12500 ppm con Moringa (4000 ppm) + Hidróxido de calcio (2600 ppm), no presentó diferencias estadísticas significativas, en el porcentaje de remoción de la DQO, comparada con el tratamiento testigo con sulfato de aluminio.
13. El mejor tratamiento desde el punto de vista técnico y costo-efectivo para el agua residual del beneficio del café a una concentración de 12500 ppm como DQO fue Extracto de Jatropha (1500 ppm) + Hidróxido de calcio (3000 ppm). y para una concentración de 25000 ppm como DQO fue Extracto de Moringa (5000 ppm)+Hidróxido de calcio (4600 ppm).

## 10. RECOMENDACIONES

Mediante la presente investigación se lograron obtener las dosis óptimas de adición de coagulantes naturales extraídos de las especies *Moringa oleifera* y *Jatropha curcas*, que lograron iguales o mejores resultados, en la depuración de las aguas residuales del beneficio del café, comparados con el tratamiento químico utilizando sales de aluminio.

Es recomendable continuar investigaciones en esta temática que permitan responder a las siguientes preguntas de investigación.

1. El costo del tratamiento, considerando las dosis de los coagulantes naturales recomendadas, su costo de extracción y compáralo con el costo que tienen las sales de hierro y aluminio.
2. La cantidad, tratamiento y utilidad de los lodos generados en el tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, utilizando coagulantes naturales y su comparación, con impacto ambiental, con los lodos obtenidos utilizando sales de hierro y aluminio (que son las que se utilizan en el tratamiento químico convencional).
3. Diseño, instalación y evaluación de sistemas de tratamiento terciario que permitan, después de la aplicación de los coagulantes naturales, cumplir con los parámetros y valores máximos admisibles para vertimientos, de acuerdo con la normativa ambiental vigente.

## 11. LITERATURA CITADA

- ABIDIN, Z. Z., SHAMSUDIN, N. S. M., MADEHI, N., & SOBRI, S. (2013). Optimisation of a method to extract the active coagulant agent from *Jatropha curcas* seeds for use in turbidity removal. *Industrial Crops and Products*, 41, 319-323.
- ANASTASAKIS, K., KALDERIS, D., & DIAMADOPOULOS, E. (2009). Flocculation behavior of mallow and okra mucilage in treating wastewater. *Desalination*, 249(2), 786-791.
- ANTOV, M. G., SCIBAN, M. B., ADAMOVIĆ, S. R., & KLAŠNJA, M. T. (2007). Investigation of isolation conditions and ion-exchange purification of protein coagulation components from common bean seed. *Acta Periodica Technologica*, (38), 3-10.
- APHA, AWWA, WPCF. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid (España), Ediciones Díaz de Santos. 1914 p.
- ARCILA, H. R., & PERALTA, J. J. (2016). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), 136-153.
- CALLE V., H. *Subproductos del café*. Chinchiná (Colombia). Cenicafé. 1977. 84 p. (Boletín Técnico N° 6).
- CÁRDENAS, Y., A (2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. SEDAPAL Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico. Lima, Perú. 44p.
- CENICAFÉ- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DEL CAFÉ (2011). *Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana*. Federación Nacional de Cafeteros. Chinchiná, Caldas. Colombia. 91 p.
- CHOY, S. Y., PRASAD, K. M. N., WU, T. Y., RAGHUNANDAN, M. E., & RAMANAN, R. N. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of environmental sciences*, 26(11), 2178-2189.
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. (2016). *El café de Colombia*. Caficultura Colombiana. La zona cafetera colombiana. Disponible en <http://www.cafedecolombia.com>. Fecha de consulta: Diciembre 2016.



- FERNÁNDEZ, A.; CHÁVEZ, M.; HERRERA, F.; MAS Y RUBI, M.; MEJIAS, D.; DÍAZ, A. 2008. Evaluación del exudado gomoso de Acacia siamea como coagulante en la clarificación de las aguas para consumo humano. Rev. Tec. Ing. U. Zulia. 31(Ed. Especial):32-40
- GARCÍA F., B. (2007). Metodología de Extracción in situ de Coagulantes Naturales para la Clarificación de Agua Superficial Aplicación en Países en Vías de Desarrollo. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de seguridad industrial, radiofísica y medioambiental. Valencia (España) 121 p.
- GUTIÉRREZ S., M.L; MERA A, C.F (2014) Evaluación del efecto Coagulante y floculante de la semilla de Moringa (Moringa Oleifera) como alternativa de manejo de aguas residuales en sistemas integrados de producción agropecuaria. Universidad del Cauca. Facultad de Ciencia Agropecuarias. (Popayán, Colombia) 90 p.
- GUZMÁN, L.; VILLABONA, Á.; TEJADA, C.; GARCÍA, R. (2013) Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 16(1): 253 – 262. Bogota (Colombia) 10 p.
- HACH COMPANY. (1988). DR/2000 Spectrophotometer. Procedures Manual. Loveland, Colorado, USA. 394 p.
- HERNÁNDEZ M., J.L, CASTRO V., A.F (2014) Determinación de la eficiencia de la semilla de Moringa oleifera (mo) utilizada como sustancia coagulante en el proceso de coagulación/floculación de las aguas residuales de la central de sacrificio de la ciudad de Popayán, departamento del cauca. (Popayán, Colombia) 103 p.
- IDEAM, Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C., 2015. 496 páginas
- NIETO C.R; ORELLANA V.P. (2011). Aplicación del quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante. (Trabajo de grado), Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales: Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. 1-132.

- OKUDA, T., BAES, A. U., NISHIJIMA, W., & OKADA, M. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. *Water research*, 35(2), 405-410.p.
- PRITCHARD, M., CRAVEN, T., MKANDAWIRE, T., EDMONDSON, A. S., & O'NEILL, J. G. (2010). A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water—An alternative sustainable solution for developing countries. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(13), 798-805.
- PRITCHARD, M., MKANDAWIRE, T., EDMONDSON, A., O'NEILL, J. G., & KULULANGA, G. (2009). Potential of using plant extracts for purification of shallow well water in Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(13), 799-805.
- QUEZADA-MORENO, W. F., & GALLARDO-AGUILAR, I. (2014). Obtención de extractos de plantas mucilaginosas para la clarificación de jugos de caña. *Tecnología Química*, 34(2), 114-123.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA (1984). Ministerio de Salud. Decreto número 1594 de 1984. Bogotá, D.C. 48 p.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA (1997). Congreso de Colombia. Ley 373 de 1997. Bogotá, D.C. 6p.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA (2002). RAS 2000. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Título E. Tratamiento de Aguas Residuales. Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Bogotá D. C. 145 p.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA (2003). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Departamento Nacional de Planeación. Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia. Versión Final. Bogotá, D.C. Diciembre.59 p.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA (2004). Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia. Bogotá, D.C. Junio de 2004. 36 p.

- REPÚBLICA DE COLOMBIA (2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto Número 3930. Bogotá (Colombia). 29 p.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA (2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Viceministerio de Ambiente. Dirección de Ecosistemas. Grupo de Recurso Hídrico. 124 p.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA (2012). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto Número 303. Bogotá, D.C. 3 p.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA (2012). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto Número 2667. Bogotá, D.C. 15 p.
- ROA, G.; OLIVEROS, C.E.; ÁLVAREZ, J.; RAMÍREZ, C.A.; SANZ, J.R.; DÁVILA, M.T.; ÁLVAREZ, J.R.; ZAMBRANO, D.A.; PUERTA, G.I.; RODRÍGUEZ, N.(1999). Beneficio Ecológico del café. Chinchiná (Colombia), CENICAFÉ. 1999. 300
- RODRÍGUEZ M., J.P.; LUGO U., I.P.; ROJAS C., A.V.; MALAVER C., C. 2007. Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. Umbral Científico. 11:8-16.
- RODRÍGUEZ V., N. (2009). Estudio de un Biosistema Integrado para el Postratamiento de las Aguas Residuales del Café utilizando Macrófitas Acuáticas. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. España. 552 p.
- RODRÍGUEZ V., N. (2015). Módulo Manejo Integrado del Agua. Universidad de Manizales. 177 p.
- RODRIGUEZ V.,N; SANZ U.,J.R; OLIVEROS T., C.E; RAMIREZ G., C.A (2015). Beneficio del café en Colombia. Prácticas y estrategias para el ahorro uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café. Federación Nacional de Cafeteros. Chinchiná, Caldas. Colombia. 37 P.

SCIBAN, M., KLASNJA, M., ANTOV, M., & SKRBIC, B. (2009). Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource technology*, 100(24), 6639-6643.

SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE BIODIVERSIDAD DE COLOMBIA-SIB.

Catálogo de la biodiversidad. Disponible en: <http://catalogo.biodiversidad.co/>.

Fecha de consulta: agosto de 2016.

VARGAS C., M; ROMERO E., L.G. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. (19-4). Costa Rica.41 p.

YIN, C. Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 45(9), 1437-1444.

YONGABI, K. A. (2004). Studies on the potential use of medicinal plants and macrofungi (lower plants) in water and waste water purification. In *Proceedings of an E-seminar organized by the International Organization for Biotechnology, Bioengineering*.

ZAMBRANO F., D. A.; ISAZA H., J.D.; RODRÍGUEZ V., N.; LÓPEZ P., U. (1999). Tratamiento de Aguas Residuales del Lavado del Café. *Boletín técnico de Cenicafé* No.20:1-26.

ZAMBRANO F., D. A; RODRÍGUEZ V., N. (2008). Sistemas para el tratamiento de aguas mieles: Investigación aplicada en beneficio de los productores cafeteros. *Chinchiná* (Colombia), Cenicafé. *Disciplina de Calidad y Manejo Ambiental*. 19 p.

ZAMBRANO F., D.A.; RODRÍGUEZ V., N.; LÓPEZ P., U.; ZAMBRANO G.,A.J.(2010) Construya y opere su sistema modular de tratamiento anaerobio para las aguas mieles. *Federación Nacional de Cafeteros- Cenicafé, Chinchiná, Colombia*. 36p.

## 12. ANEXOS

### Anexo1. Resultados del análisis estadístico realizado

15:49 Monday, March 15,

2017 1

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	6	T1 T2 T3 T4 T5 T6

Number of observations 75

NOTE: All dependent variables are consistent with respect to the presence or absence of missing values. However only 60 observations can be used in this analysis.

15:49 Monday, March 15,

2017 2

The GLM Procedure

Dependent Variable: V1 V1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	1594.157219	318.831444	187.27	<.0001
Error	54	91.936147	1.702521		
Corrected Total	59	1686.093366			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	V1 Mean
0.945474	1.766222	1.304807	73.87560

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	1594.157219	318.831444	187.27	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	1594.157219	318.831444	187.27	<.0001

15:49 Monday, March 15,

2017 3

The GLM Procedure

Dependent Variable: V2 V2

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	421.9465658	84.3893132	236.26	<.0001
Error	54	19.2884688	0.3571939		
Corrected Total	59	441.2350347			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	V2 Mean
0.956285	0.663636	0.597657	90.05797

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	421.9465658	84.3893132	236.26	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	421.9465658	84.3893132	236.26	<.0001

15:49 Monday, March 15,

2017 4

The GLM Procedure

Duncan's Multiple Range Test for V1

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	54
Error Mean Square	1.702521

Number of Means	2	3	4	5	6
Critical Range	1.170	1.231	1.271	1.300	1.322

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	TRAT
A	78.7664	10	T6
A			
A	78.3672	10	T5
A			
A	77.9128	10	T4
B	71.9920	10	T2
B			
B	71.9112	10	T1
C	64.3040	10	T3

15:49 Monday, March 15,

2017 5

The GLM Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for V1

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II

error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	54
Error Mean Square	1.702521
Critical Value of Studentized Range	4.17827
Minimum Significant Difference	1.724

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	TRAT
A	78.7664	10	T6

A			
A	78.3672	10	T5
A			
A	77.9128	10	T4
B			
B	71.9920	10	T2
B			
B	71.9112	10	T1
C			
C	64.3040	10	T3

15:49 Monday, March 15,

2017 6

The GLM Procedure

Duncan's Multiple Range Test for V2

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	54
Error Mean Square	0.357194

Number of Means	2	3	4	5	6
Critical Range	.5359	.5637	.5820	.5952	.6055

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	TRAT
A	93.4565	10	T2
A			
A	93.1609	10	T1
B			
B	90.9130	10	T3
C			
C	88.5522	10	T6
D			
D	87.8043	10	T5
E			
E	86.4609	10	T4

15:49 Monday, March 15,

2017 7

The GLM Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for V2

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II

error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	54
Error Mean Square	0.357194
Critical Value of Studentized Range	4.17827
Minimum Significant Difference	0.7897

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	TRAT
----------------	------	---	------

A	93.4565	10	T2
A			
A	93.1609	10	T1
B			
B	90.9130	10	T3
C			
C	88.5522	10	T6
C			
C	87.8043	10	T5
D			
D	86.4609	10	T4



15:49 Monday, March 15,

2017 1

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
TRAT	6	T1 T2 T3 T4 T5 T6

Number of observations 70

NOTE: All dependent variables are consistent with respect to the presence or absence of missing values. However only 60 observations can be used in this analysis.

15:49 Monday, March 15,

2017 2

The GLM Procedure

Dependent Variable: V1 V1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	1197.788273	239.557655	228.69	<.0001
Error	54	56.567314	1.047543		
Corrected Total	59	1254.355587			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	V1 Mean
0.954903	1.412800	1.023495	72.44447

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	1197.788273	239.557655	228.69	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	1197.788273	239.557655	228.69	<.0001

15:49 Monday, March 15,

2017 3

The GLM Procedure

Dependent Variable: V2 V2

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	359.0585367	71.8117073	222.55	<.0001
Error	54	17.4245192	0.3226763		
Corrected Total	59	376.4830560			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	V2 Mean
0.953718	0.641054	0.568046	88.61122

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	359.0585367	71.8117073	222.55	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRAT	5	359.0585367	71.8117073	222.55	<.0001

15:49 Monday, March 15,

2017 4

The GLM Procedure

Duncan's Multiple Range Test for V1

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	54
Error Mean Square	1.047543

Number of Means	2	3	4	5	6
Critical Range	0.918	0.965	0.997	1.019	1.037

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	TRAT
A	77.9252	10	T1
B	76.9080	10	T3
C	74.9112	10	T2
D	70.6732	10	T5
E	68.5376	10	T6
F	65.7116	10	T4

15:49 Monday, March 15,

2017 5

The GLM Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for V1

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II

error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	54
Error Mean Square	1.047543
Critical Value of Studentized Range	4.17827
Minimum Significant Difference	1.3523

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	TRAT
A	77.9252	10	T1

A			
A	76.9080	10	T3
B	74.9112	10	T2
C	70.6732	10	T5
D	68.5376	10	T6
E	65.7116	10	T4

15:49 Monday, March 15,

2017 6

The GLM Procedure

Duncan's Multiple Range Test for V2

NOTE: This test controls the Type I comparisonwise error rate, not the experimentwise error rate.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	54
Error Mean Square	0.322676

Number of Means	2	3	4	5	6
Critical Range	.5093	.5357	.5531	.5658	.5755

Means with the same letter are not significantly different.

Duncan Grouping	Mean	N	TRAT
A	92.1673	10	T3
B	91.1731	10	T2
C	88.4981	10	T1
D	87.6462	10	T5
D	87.3269	10	T6
E	84.8558	10	T4

15:49 Monday, March 15,

2017 7

The GLM Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for V2

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II

error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	54
Error Mean Square	0.322676
Critical Value of Studentized Range	4.17827
Minimum Significant Difference	0.7506

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	TRAT
----------------	------	---	------

A	92.1673	10	T3
B	91.1731	10	T2
C	88.4981	10	T1
D	87.6462	10	T5
D	87.3269	10	T6
E	84.8558	10	T4