

**EVALUACIÓN DE CONCENTRACIONES DE CARBÓN ACTIVADO PARA LA
ELIMINACIÓN DE GENERADORES DE SABOR EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE BOSCONIA, SANTANDER.**

EDWING JAVIER HERRERA RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2018

**EVALUACIÓN DE CONCENTRACIONES DE CARBÓN ACTIVADO PARA LA
ELIMINACIÓN DE GENERADORES DE SABOR EN LA PLANTA DE
TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE BOSCONIA, SANTANDER.**

EDWING JAVIER HERRERA RODRÍGUEZ

PROYECTO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

DIRECTOR:

ÁLVARO ANDRES CAJIGAS CERÓN

MAGISTER EN INGENIERÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2018

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios quien es la base y cimiento fundamental de mi vida.

A mi madre, porque ella es la persona que me dio la oportunidad de la vida, me inculcó valores, consejos y finalmente me brindó un apoyo incondicional.

A mi novia quien ha sido parte de este largo camino brindándome apoyo, confianza, amor y fuerzas para seguir adelante en estos cinco años de pregrado.

Un agradecimiento especial para aquellos que hicieron parte de este proyecto, al ingeniero Álvaro Cajigas por darme la oportunidad de pertenecer al proyecto, a la ingeniera Paola Reyes por su guía durante el proyecto, a la docente Maryory Villamizar por su colaboración en el análisis estadístico y por último a mis compañeros del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. OBJETIVO GENERAL	11
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
3. MARCO TEORICO	12
3.1. Planta De Tratamiento de Agua Potable: Bosconia AMB.....	12
3.2. Origen del sabor en el agua potable.....	13
3.2.1. Tipos de sabor y olores en el agua.....	13
3.2.2 Cianobacterias	14
3.2.3 Geosmina y mib	15
3.3. Carbón Activado en Polvo (CA).....	17
3.4. Concentraciones de GSM - MIB y CA	17
3.5. Partículas Coloidales.....	18
3.5. Coagulación	20
3.5.1. Factores que influyen en la Coagulación.....	21
3.5.2. Clases de Coagulantes.....	22
3.6. Floculación	23
3.6.1. Factores que influyen en la Floculación	24
3.7. Sedimentación.....	24
3.7.1. Tipos de sedimentación.....	25
3.8. Filtración.....	25
3.8.1. Tipología de un filtro.....	26
3.9. Cloración.....	28
3.11. Puntos de aplicación del CA	31
4. METODOLOGÍA	32
4.1. Revisión bibliográfica	32
4.2. Diseño experimental desarrollado	32
4.2.1. Unidad experimental.....	32
4.2.2 Variables dependientes e independientes	33
4.2.3 Factores y niveles.....	33
4.3. Implementación del diseño experimental	37
4.3.1. Toma de muestras	37

4.3.2. Equipos y materiales utilizados	37
4.3.3. Montaje de la unidad experimental	38
4.4. Evaluación del efecto de la aplicación de carbón activado en el tratamiento del agua 41	
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
5.1. Análisis del efecto de la aplicación de carbón activado en el tratamiento del agua	42
5.2. Remoción de GSM y MIB	48
5.3. Evaluación del punto de aplicación del CA en el tren de tratamiento de agua potable. 51	
5.4. Análisis de parámetros fisicoquímicos	51
6. CONCLUSIONES	60
7. RECOMENDACIONES	61
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62
9. ANEXOS	66
9.1. Referencias fotográficas del proceso de test de jarras	66
9.2. Resultados de catación	67

TABLAS

<i>Tabla 1. Sabores y olores según el compuesto</i>	13
Tabla 2. Referencias bibliográficas de aplicación de Geosmina, MIB, y carbón activado.	18
Tabla 3. Referencias bibliográficas de puntos de aplicación de carbón activado en PTAP.	31
Tabla 4. Dosis de carbón activado aplicadas.....	34
<i>Tabla 5. Dosis aplicadas de GSM y MIB</i>	34
<i>Tabla 6. Equipos utilizados</i>	37
<i>Tabla 7. Tiempos y Revoluciones por minuto aplicados a los tratamientos</i>	40
<i>Tabla 8. Catación de agua tratada</i>	42
<i>Tabla 9. Resultados de catación de agua con aplicación de carbón activado en la etapa de pretratamiento.</i>	43
<i>Tabla 10. Resultados de catación de agua con aplicación de carbón activado en la etapa de coagulación.</i>	45

<i>Tabla 11. Resultados de catación de agua con aplicación de carbón activado en la etapa de floculación.....</i>	47
<i>Tabla 12. Resultados de Masa removida de GSM y MIB con Aplicación de CA en el Pretratamiento</i>	49
<i>Tabla 13. Resultados de Masa removida de GSM y MIB con Aplicación de CA en la floculación..</i>	50
<i>Tabla 14. pH inicial del agua.....</i>	52
<i>Tabla 15. Conductividad inicial del agua.....</i>	54
<i>Tabla 16. Turbiedad inicial del agua.....</i>	56
<i>Tabla 17. Color inicial del agua</i>	58

FIGURAS

<i>Figura 1. Planta de Bosconia.....</i>	13
<i>Figura 2. Prueba de jarras</i>	30
<i>Figura 3. Diseño experimentalFuente: Autor</i>	36
<i>Figura 4. Preparación de muestras de agua por tratamiento.....</i>	39
<i>Figura 5. Montaje experimental en el test de jarras.</i>	39
<i>Figura 6. Comportamiento del pH en el agua después de aplicado el CA.....</i>	53
<i>Figura 7. Comportamiento de la conductividad en el agua después de aplicado el CA</i>	55
<i>Figura 8. Comportamiento de la turbiedad en el agua después de aplicado el CA</i>	57
<i>Figura 9. Comportamiento del color en el agua después de aplicado el CA</i>	59

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DE CONCENTRACIONES DE CARBÓN ACTIVADO PARA LA ELIMINACIÓN DE GENERADORES DE SABOR EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE BOSCONIA, SANTANDER.

AUTOR(ES): Edwing Javier Herrera Rodríguez

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Álvaro Andrés Cajigas Ceron

RESUMEN

La presente investigación se basó en la evaluación de concentraciones de carbón activado para la eliminación de generadores de sabor, en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia. Dicha evaluación se realizó por problemas de sabor en el agua ya tratada, causado por floraciones de algas verde-azules las cuales derivan en metabolitos de geosmina y 2-metilisoborneol que son los responsables del sabor terro-mohoso. Es por ello que surge la necesidad del uso de un agente como el carbón activado para la remoción de estos metabolitos. Asimismo, se empleó un diseño experimental por niveles el cual se hizo efectivo por medio de prueba de jarras, simulando el tren de tratamiento de la planta de Bosconia. Los resultados arrojados por la prueba de jarras determinaron una tendencia a dosis altas de carbón activado en un rango de 20, 30 y 40 mg/l para la eliminación del sabor terro-mohoso, además de las tres etapas evaluadas del proceso de potabilización (pretratamiento coagulación y floculación) la de mejor influencia para la aplicación de carbón activado fue el pretratamiento según los resultados obtenidos por catación. En conclusión, concentraciones tanto bajas como altas de geosmina y mib requieren dosis altas de carbón activado para hacer efectiva su remoción. El pretratamiento tuvo el mayor contacto con el carbón activado el cual fue contundente en los resultados por ende el tiempo es esencial para mejorar en rol del carbón activado en la eliminación de generadores de sabor.

PALABRAS CLAVE:

Sabor, tratamiento del agua, Carbón activado, Geosmina, MIB, propiedades fisicoquímicas.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF ACTIVATED CARBON CONCENTRATIONS FOR THE ELIMINATION OF TASTE GENERATORS IN THE DRINKING WATER TREATMENT PLANT OF BOSCONIA, SANTANDER.

AUTHOR(S): Edwing Javier Herrera Rodríguez

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Álvaro Andrés Cajigas Ceron

ABSTRACT

The present investigation was based on the evaluation of concentrations of activated carbon for the elimination of flavour in the Bosconia drinking water treatment plant. This evaluation was carried out due to taste problems in the water already treated, caused by blooms of blue-green algae which result in metabolites of geosmin and 2-methylisoborneol which are responsible for the earthy-musty odours. That is why the need arises for the use of an agent such as activated carbon for the removal of these metabolites. In addition, an experimental design by levels was used, which was made effective by jar- test, simulating the train treatment of the Bosconia plant. The results obtained by the jar test determined a tendency to high doses of activated carbon in a range of 20, 30 and 40 mg / l for the elimination of the earthy-musty odours, Also the three stages evaluated of the purification process (pre-treatment coagulation and flocculation) the best influence for the application of activated carbon was the pre-treatment according to the results obtained by the water tasting. In conclusion, both low and high concentrations of geosmin and mib require high doses of activated carbon to effect their removal. The pre-treatment had the longest contact with the activated carbon which was conclusive in the results therefore time is essential to improve the role of activated carbon in the elimination of flavour generators.

KEYWORDS:

90/5000 Taste, water treatment, activated carbon, geosmin, MIB, physicochemical properties.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCION

Los florecimientos algales han sido por mucho tiempo una preocupación en plantas potabilizadoras de agua, debido al sabor y olor terro-mohoso asociado en particular a los metabolitos derivados por las algas verde-azuladas, Geosmina y 2-metilisoborneol; los cuales son detectados en el agua a niveles extremadamente bajos, con concentraciones perceptibles por el sentido del gusto humano que oscilan entre los 10 y 20 ng/l.

Según (Action, 2010), se ha determinado que diferentes condiciones inciden en los brotes de algas y éstas pueden ser las primeras señales de alerta, como épocas de intenso verano donde las condiciones de luz, temperatura, y el cauce lento de los ríos son favorables para el crecimiento exponencial de geosmina y MIB.

Existen casos asociados a grandes poblaciones donde se presentaron episodios de sabor, en Montevideo (1,6 millones habitantes) se vio afectada por episodios de olores y sabores desagradables provocados por la geosmina que afectaron al río Santa Lucía, principal fuente de agua superficial de la ciudad. En el primer cuatrimestre del 2012, la problemática de la Geosmina y el MIB en el agua afectaba a más de 5,5 millones de habitantes en 10 de las 16 delegaciones en que se divide la Ciudad de México. Además, estudios de la AWWA (American Water Works Association) indican que, en Estados Unidos y Canadá, de entre 800 plantas potabilizadoras basadas en agua superficial, el 43% de las mismas manifestó problemas de sabor y olor terro-mohoso con duraciones mayores a una semana.

Dentro de las alternativas generales para combatir el sabor y olor en el agua potable, se destaca la preoxidación y adsorción de estos compuestos. La primera, utiliza compuestos oxidantes como: cloro, permanganato de potasio, dióxido de cloro, ozono y procesos

avanzados de oxidación; por su parte el método de adsorción utiliza el carbón activado, ya que posee un alto poder de adsorción de micropartículas, entre las que se encuentran las partículas de sabor y olor en el agua. No obstante, la relación dosis de carbón activado versus tratamiento debe ser estudiado específicamente según el tipo de planta en que se quiera implementar, por lo cual es importante definir alguna metodología que pueda relacionar estas con la eliminación de Geosmina y MIB (Aguilera & Titus, 2013).

Teniendo en cuenta lo anterior, y la problemática actual de sabor y olor terro-mohoso presentado en el agua distribuida por la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia, se buscó evaluar la capacidad de remoción de carbón activado a diferentes concentraciones y puntos de aplicación para la eliminación de generadores de sabor en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga-AMB.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- ✓ Evaluar la capacidad de remoción de carbón activado para la eliminación de generadores de sabor en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga-AMB.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Determinar la influencia de la concentración de carbón activado para la remoción de generadores de sabor en agua tratada.
- ✓ Determinar el punto de aplicación de carbón activado dentro del tren de tratamiento para la remoción de sabor en agua tratada.
- ✓ Evaluar el efecto de la aplicación de carbón activado sobre la calidad de agua final del proceso de tratamiento.

3. MARCO TEORICO

Las causas de los problemas de sabor, relacionan principalmente con el brote de microorganismos en las fuentes de agua cruda. Este brote de microorganismos ocurre cuando existen condiciones de temperatura y nutrientes, las cuales favorecen el desarrollo de ciertas algas o bacterias, las cuales generan compuestos de olor y sabor desagradable.

Se explica los puntos importantes del tren de tratamiento como sus funciones y su respectiva relevancia además datos importantes sobre la planta de Bosconia todo esto como guía esencial para el desarrollo del proyecto.

3.1. Planta De Tratamiento de Agua Potable: Bosconia AMB

La planta de tratamiento de Bosconia construida en Bucaramanga, Santander con el fin de mejorar el flujo de agua potable de su área metropolitana, capta el agua del río Surata, en conjunto con el Río Tona y Río Frío para así lograr cubrir el abastecimiento necesario de agua tratada.(AMB, 2017)

La Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia está localizada en la vía que conduce de Bucaramanga, al municipio de Matanza, al Nororiente de la ciudad, entre las cotas topográficas 685 y 675 msnm. (AMB, 2017).

La planta posee una capacidad de 2000 L/s, y es de tipo convencional con tanques desarenadores, pre sedimentadores, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación, filtración y cloración.

Figura 1. Planta de Bosconia



Fuente AMB

3.2. Origen del sabor en el agua potable

La presencia de metabolitos producidos por microorganismos, es la principal causa de problemas relacionados con el sabor y olor del agua tratada. Sin embargo, los vertidos químicos y de aguas residuales también generan productos químicos que pueden alterar el olor y sabor tanto en aguas superficiales como en aguas subterráneas.

3.2.1. Tipos de sabor y olores en el agua

El agua puede tener sabor como olor generalmente por compuestos o productos químicos, a continuación, en la siguiente tabla se muestra ciertos tipos de compuestos a tener en cuenta.

Tabla 1. Sabores y olores según el compuesto

COMPUESTO	FUENTE	OLOR/SABOR
Terroso/Humedad/Mohoso		
Geosmina (1,2,7,7-tetrametil-2-norborneol)	Actinomicetos, cianobacterias	Terroso
MIB (2- Metilisoborneol)	Actinomicetos, cianobacterias	Humedad-Moho
Isopropil metoxi piramizina	Actinomicetos	Recipiente de papas, humedad

Cadinene-ol	Actinomicetos	Madera/terroso
Cloroanisol	Metilación de clorofenol	Humedad
Fragante/Vegetal/Frutal/Floral		
Trans-2,cis-6- nonadienal	Algas	Pepino
Aldehídos (PM > C7)	Ozonización	Frutal/Fragante
Desconocidos de hongos y bacterias	Descomposición de algas, vegetación	Descomposición
Pescado		
n-Hexanal y n-Heptanal	Algas flageladas, diatomeas	Pescado
Decadienal	Algas flageladas	Aceite de hígado de bacalao
Hepta- y decadienal	Algas Dinobryon	Pescado
Cloro/Ozono		
Cloro libre	Desinfección de agua	Cloro
Monocloramina	Desinfección de agua	Cloro
Dicloramina	Desinfección de agua	Piscina
Ozono	Desinfección de agua	Ozono

Fuente: Autor

3.2.2 Cianobacterias

Se trata de bacterias fotosintéticas que, además de verdeazuladas, también pueden ser rojas, marrones o amarillas. Se encuentran con frecuencia en aguas eutróficas (aguas con altos niveles de nutrientes) y embalses poco profundos, y aparecen como espuma superficial, depósitos bénticos (en el fondo) y en plantas acuáticas. En los años 60 y 70 se descubrió que las cianobacterias generan geosmina y MIB como subproductos intracelulares. Cuando se producen floraciones, las bacterias mueren y liberan productos químicos, los cuales pueden presentar olor y sabor a tierra húmeda o moho, dependiendo del compuesto presente (Tarrant et al., 2009).

3.2.3 Geosmina y MIB

Las cianobacterias son organismos que se reproducen más en ciertas épocas del año, sus agrupaciones en el agua son llamadas comúnmente “florecimientos”. Un florecimiento es el incremento, significativamente mayor al promedio, de algún tipo de alga respecto al de la biomasa total de fitoplancton. El florecimiento de las poblaciones de cianobacterias representa un problema para los cuerpos de agua para uso en actividades humanas, debido principalmente al incremento en la producción de metabolitos causantes de olor y sabor así como de tipo tóxico los cuales, en algunas ocasiones, tienen un efecto letal sobre los diversos organismos habitantes de dichos cuerpos (*Pesquero, 2009*). Se relacionan generalmente con una o dos especies y se identifican por el tipo de fitoplancton dominante (*UNAM, 2017*), entre los que se encuentran la geosmina (GSM) y 2-metilisoborneol (MIB), mayormente asociadas con el olor y sabor terro-mohoso que se produce en el agua (*POSADA, 2000*).

El MIB - 2-methylbornano, es un terpenoide bicíclico, la estructura es un esqueleto formado por hidrógeno, carbono y oxígeno, que tiene un diámetro molecular de 0.6 nm. Las células de algas como el MIB (2-metilisoborneol) generan de forma natural productos químicos con olor y sabor a moho. Muchas personas detectan este sabor y olor en concentraciones entre 5 y 10 partes por trillón. Cuando se producen brotes de algas y bacterias en un acuífero, las concentraciones de los compuestos que alteran el olor y sabor aumentan hasta niveles por encima de este umbral y pueden generar problemas (Trojan Technologies España, 2014).

La Geosmina (GSM) o Trans-1,10-dimethyl-trans-9-decalol, fue identificada en 1965 primero en actinomicetos y después en cianobacterias por el año de 1967 como el componente principal del olor terroso en suelo y agua, la estructura se publicó en 1968. El

nombre Geosmina es derivado de las palabras griegas “ge” y “osme” que significan tierra y olor respectivamente (*Gerber y Lechevalier, 1965*).

Según *Brient, Vézic, & Bertru, 2001*, la Geosmina y MIB como metabolitos de las cianobacterias poseen facilidad de crecimiento lo que favorece su aparición tanto en el suelo como en el medio acuático, preferentemente en ciertas condiciones como las siguientes:

- ✓ Ambientes limnicos formados por aguas dulces alcalinas o neutras con pH elevados.
- ✓ Cuando se presentan altas concentraciones de nitrógeno con una relación N/P < 16 en forma de nitrato, amoníaco y fosforo mayor de 40 ug/L favorecen el crecimiento.
- ✓ Otro factor que influye son las temperaturas entre 15 y 30 °C son las más óptimas para el florecimiento.
- ✓ La exposición a una cantidad considerable de luz, pero no en exceso ya que a altos niveles de luz puede degradar el aparato fotosintético y por ende causar foto-inhibición lo cual causa un decrecimiento. Por medio de estudios se ha demostrado que las especies formadoras de florecimientos por su sensibilidad a la luz su desplazamiento es vertical dentro de un cuerpo de agua.

Drikas, Dixon, & Morran, 2009 manifestaron que las concentraciones mínimas de geosmina y MIB percibidas en plantas de potabilización de agua oscilaban entre valores de 10 ng/L y 20 ng/L, partiendo como punto base para ensayos a escala de laboratorio. Según *Cook, Newcombe, & Sztajnbok, 2001* los rangos recomendados para pruebas de eliminación de GSM y MIB con carbón activado en polvo CA varían entre 20-300ng/L en planta. Los anteriores son valores más comunes teniendo como media de GSM y MIB 100 ng/L, que van de la mano con el flujo de agua, temporada del año y así misma

temperatura; dependiendo de estos factores los valores pueden incrementar como disminuir.

3.3. Carbón Activado en Polvo (CA)

El carbón activado en polvo (CA) es un carbón poroso producido artificialmente de manera que exhiba un elevado grado de porosidad, cuyas partículas en polvo para el tratamiento de agua, el 99% debe pasar por la malla 100 mm, 95% debe pasar la de 200 mm, y 90% la malla 325 mm. Esta característica, junto con la naturaleza química de los átomos de carbón que lo conforman, le dan propiedades de atraer y atrapar ciertas moléculas pequeñas, como lo son las que corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y muchos solventes.

El carbón activado posee la virtud de adherir o retener en su superficie uno o más componentes (átomos, moléculas, iones) que se encuentran disueltas en el líquido que está en contacto con él. Este fenómeno se denomina poder adsorbente. La adsorción es la responsable de purificar, deodorizar y decolorar el agua u otros líquidos o gases que entren en contacto con el elemento adsorbente.

3.4. Concentraciones de GSM - MIB y CA

Para el desarrollo de replicar las etapas del tren de tratamiento y encontrar las dosis de geosmina y MIB como del carbón activado, se realizó una revisión teórica de artículos que

mencionan esta problemática de sabor y olor en agua tratada, a continuación se presenta un resumen bibliográfico como base, para escoger las dosis a trabajar.

Tabla 2. Referencias bibliográficas de aplicación de Geosmina, MIB, y carbón activado.

TITULO	AUTORES	[] GEOSMINA	[] MIB	[] CARBON ACTIVADO
Adsorption of geosmin and 2-methylisoborneol onto powdered activated carbon at non-equilibrium conditions: Influence of NOM and process modelling.	(Zoschke, Engel, Bo, & Worch, 2011)	100ng/L	100ng/L	2 mg/L 4 mg/L 6 mg/L 8 mg/L 10 mg/
Interference of iron as a coagulant on MIB removal by powdered activated carbon adsorption for low turbidity waters.	(Zoschke et al., 2011)	200ng/L 400 ng/L	100ng/L	2 mg/L 4 mg/L 6 mg/L 8 mg/L 10 mg/L 20 mg/L
Treatment of taste and odor causing compounds 2-methyl isoborneol and geosmin in drinking water: A critical review	(Srinivasan & Sorial, 2011)	70 ng/L	4 ng/L 30 ng/L 40 ng/L	50 mg/L 250 mg/L
the application of powdered activated carbon for mib and geosmin removal: predicting CA doses in four raw waters	(Srinivasan & Sorial, 2011)	100 ng/L 300 ng/L	100 ng/L 300 ng/L	15 mg/L 20 mg/L 40 mg/L

Fuente Autor

3.5. Partículas Coloidales

En el proceso de potabilización del agua los coloides son un concepto importante para la eficaz purificación del recurso agua. Los coloides, son partículas que se encuentran estabilizadas por una serie de cargas de igual signo sobre su superficie, haciendo que se repelan dos partículas vecinas como se repelen dos polos magnéticos. Esto impide el choque

de las partículas y formación de masas mayores, llamadas flóculos, las partículas no sedimentan. Es por esta razón, el tratamiento de potabilización cuenta con diversas etapas las cuales ayudan a la adecuada sedimentación de partículas para una posterior remoción del agua (*UCLM, 2010*).

Las suspensiones coloidales son la causa de que estas partículas no logren sedimentar, estas consisten en dispersiones de partículas sólidas finamente divididas en la fase líquida, con diámetros desde las 0,001 a 0,1 micras, los cuales son invisibles a simple vista y al microscopio óptico ordinario. Además en una solución coloidal se encuentra que el sólido se halla disperso en forma de agregados de los iones o de las moléculas que constituyen el precipitado (*Skoog & West, 1986*). Estas suspensiones se deben a la existencia de cargas negativas repartidas en la superficie del agua, como la pequeña dimensión de las partículas coloidales presentes en esta, las cuales dan lugar a la estabilidad de las suspensiones coloidales. Características que le confieren estas propiedades a las suspensiones coloidales son el tamaño como al peso específico, en función de la capacidad de las partículas para permanecer en suspensión durante un largo tiempo (*Casero Rodríguez, 2008*).

Por la anterior circunstancia, y para efectos de sedimentación de las partículas, es necesario realizar las siguientes operaciones. Desestabilizar las partículas coloidales especialmente por la neutralización de sus cargas, fenómeno conocido con el nombre de coagulación. Además, será de vital importancia aplicar un adecuado proceso de floculación para facilitar la unión entre partículas formando agregados de mayor volumen a los cuales se les llaman flóculos, cuya velocidad de sedimentación es más elevada. Por último para conseguir la eliminación de las partículas floculadas se debe realizar la sedimentación, proceso se conoce con el nombre de decantación (*Casero Rodríguez, 2008*).

3.5. Coagulación

Según (*Restrepo Osorno, 2009*) la coagulación puede entenderse como la desestabilización eléctrica de algunas partículas mediante la adición de sustancias químicas como lo son los coagulantes. Esta operación se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible.

Este proceso se usa tanto para la remoción de turbiedad orgánica e inorgánica, no se puede sedimentar rápidamente, como para la remoción de color verdadero y aparente, eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación; destrucción de algas y plancton en general, eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, en algunos casos de precipitados químicos suspendidos en otros.

Para la evaluación de este proceso es necesario tener en cuenta las características físicas y químicas del agua, la dosis del coagulante, la concentración del coagulante, el punto de aplicación del coagulante, la intensidad y el tiempo de mezcla y el tipo de dispositivo de mezcla.

Las partículas forman la turbiedad y el color de las aguas naturales, poseen cargas eléctricas que normalmente son negativas, pero como también existen cargas eléctricas positivas, se puede afirmar que el agua y las soluciones son eléctricamente neutras. Las cargas eléctricas de las partículas generan fuerzas de repulsión entre ellas, por lo cual se mantienen suspendidas y separadas en el agua. Por ende dichas partículas no se sedimentan. El conjunto formado por estas partículas constituye un sistema coloidal, formado por una doble capa de iones, el cual es sometido a un potencial en la superficie inferior del doble lecho, denominado

potencial Z. Este potencial tiene un valor crítico, por encima del cual los coloides son estables, y por debajo de él, la repulsión en las partículas se reduce a un grado tal que chocando con cierta velocidad pueden unirse y flocular. El problema en la coagulación consiste en disminuir el potencial Z por uno de los siguientes métodos:

- Coagulación por neutralización de la carga: Esta se realiza cuando coloides de diferente signo se mezclan en el agua. Esto es lo que sucede cuando se agrega alumbre o sales de hierro al agua.
- Coagulación por disminución del espesor de la doble capa (distancia d). Al incrementarse la concentración de iones en el agua la “distancia d” disminuye, hasta hacer el valor del potencial Z inferior al punto crítico.

El fenómeno de la desestabilización se efectúa mediante una serie de reacciones químicas bastante complejas. Dentro de esas reacciones se encuentran las que se efectúan con las diversas formas de alcalinidad, por lo cual su contenido disminuye. Además, algunas de estas reacciones producen CO_2 , cuyo efecto consiste fundamentalmente en el incremento de la acidez del agua y por consiguiente la disminución del pH.

3.5.1. Factores que influyen en la Coagulación

- Valencia: Entre mayor sea la valencia del ion, más efectivo resulta como coagulante.
- Capacidad de cambio: Es una medida de la tendencia a remplazar cationes de baja valencia por otros de mayor valencia, provocando la desestabilización y aglomeración de partículas en forma muy rápida.
- Tamaño de las partículas: Las partículas deben poseer el diámetro inferior a una micra. Las partículas con diámetro entre una y cinco micras, sirven como núcleos de floc, en

cambio de diámetro superior a cinco micras, son demasiado grandes para ser incorporadas en el floc.

- **Temperatura:** La temperatura cambia el tiempo de formación del floc, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación del floc es mayor.
- **Concentración de iones H⁺ o pH:** Para cada coagulante hay por lo menos una zona de pH óptima, en la cual una buena floculación ocurre en el tiempo más corto y con la misma dosis de coagulante.
- **Relación cantidad-tiempo:** La cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación del floc.
- **Alcalinidad:** La alcalinidad guarda la relación con el pH y por lo tanto el contenido de alcalinidad del agua es uno de los factores por considerar en la coagulación.

3.5.2. Clases de Coagulantes

Los coagulantes que se utilizan en la práctica para tratamiento de agua potable son los siguientes:

Sales de Aluminio: Forman un floc ligeramente pesado. El más conocido es el Sulfato de Aluminio, $Al_2(SO_4)_3$ siendo este el que se usa con mayor frecuencia dado su bajo costo y manejo relativamente sencillo.

Sales de Hierro: Se utiliza el Cloruro Férrico, $FeCl_3$, y los Sulfatos de Hierro Férrico y Ferroso, $Fe(SO_4)_3$ y $FeSO_4$. Estas sales forman un floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento que las sales de aluminio.

Polímeros o polielectrolitos: Son compuestos complejos de alto peso molecular que se utilizan no propiamente como coagulantes sino como ayudantes de coagulación. La

dosificación de estas sustancias se lleva a cabo en concentraciones muy bajas, lo cual es una gran ventaja y compensa el costo del polímero. Están siendo ampliamente empleados en el tratamiento de aguas potables ya que se produce una menor cantidad de lodos, adicionalmente el lodo producido es más fácilmente tratable.

3.6.Floculación

La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico, denominados flóculos. Esta etapa tiene por objeto permitir el contacto entre los flóculos, la turbiedad y el color, la mezcla debe ser lo suficiente para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad, pero no muy grande, ya que los flóculos corren el riesgo de romperse; aún si el tiempo es no más del tiempo óptimo de floculación. Los flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar (*Yolanda & Cárdenas, 2000*).

Los flóculos formados por la aglomeración de varios coloides no son lo suficientemente grandes como para sedimentar con la rapidez deseada, por lo que el empleo de un floculante es necesario para reunir en forma de red, formando puentes de una superficie a otra enlazando las partículas individuales en aglomerados. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también aumenta su peso. Además hay que tener en cuenta que la rapidez con que esto ocurre depende del tamaño de las partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y de su “grado de desestabilización”, que es el que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia (*Restrepo Osorno, 2009*).

3.6.1. Factores que influyen en la Floculación

3.6.1.1. Concentración y naturaleza de las partículas: La velocidad de formación del floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.

3.6.1.2. Tiempo de detención: La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación en cámaras. Se puede decir que una eficiencia dada, se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie. Por razones de orden práctico el número de cámaras no puede ser muy grande, estableciéndose un mínimo de tres (3) unidades.

3.6.1.3. Gradiente de velocidad: Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del floc. El gradiente a través de las cámaras debe ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados.

3.7. Sedimentación

La sedimentación en su mayoría es realizada por efecto de la gravedad y es básicamente la separación de los sólidos contenidos en un líquido por efecto de la misma. Se produce en cualquier cuerpo líquido, ya sea de forma deseada o no. Es muy útil en el tratamiento de agua, sea Residual o Potable, y por definición se le denomina sedimentación al proceso por el cual se asientan los sólidos suspendidos en un fluido bajo la acción de la gravedad.

3.7.1. Tipos de sedimentación

3.7.1.1. Sedimentación simple: La sedimentación puede ser Simple cuando las partículas que se asientan son discretas, o sea partículas que no cambian de forma, tamaño o densidad durante el descenso en el fluido, un ejemplo de ello es lo que ocurre en un tanque desarenador que se coloca contiguo a la bocatoma, el objetivo de este es separar el agua de la arena.

3.7.1.2. Sedimentación inducida: La sedimentación se denomina inducida cuando las partículas que se sedimentan son aglomerables, o sea que durante la sedimentación se aglutinan entre sí cambiando de forma y tamaño y aumentando de peso específico. La sedimentación inducida es el tipo que se presenta en una planta de tratamiento y se logra en un tanque, llamado sedimentador o decantador, que se coloca a continuación del floculador y que permite la separación de las partículas floculentas que se forman en los procesos de coagulación y floculación.

3.8. Filtración

Se considera filtración al paso de un fluido a través de un medio poroso que retiene la materia que se encuentra en suspensión. En las principales instalaciones de filtración, los filtros suelen ser abiertos, mientras los filtros cerrados suelen utilizarse para instalaciones pequeñas (menor de 40m³/h) (David, 2017).

En las instalaciones de filtración de las estaciones de tratamiento de agua, el medio poroso suele ser generalmente arena, arena + antracita o bien carbón activo en grano; y la materia en suspensión está constituida por flóculos o microflóculos procedentes de la etapa anterior de decantación o bien formados expresamente cuando se sigue el proceso conocido como "micro floculación sobre filtro" o filtración directa". Los filtros de estas instalaciones, generalmente

son abiertos, con velocidades de filtración entre 6 y 15 m/h, empleándose los filtros cerrados a presión en instalaciones pequeñas (menores de 50 m³ /h).

El espesor de la capa de arena suele oscilar entre 0,7 y 1 m. y la talla efectiva entre 0.8 y 1mm con un coeficiente de uniformidad entre 1,5 y 1,7. En el caso de lechos bicapa, el espesor de arena es 1/3 del total y sobre ella una capa de antracita de 2/3 del espesor total y talla efectiva entre 1,2 y 2,5 mm.

Realmente, el espesor y granulometría depende de la velocidad de filtración, del tamaño y naturaleza de las partículas que van a ser retenidas y de la pérdida de carga disponible.

3.8.1. Tipología de un filtro.

Dependiendo de la función se puede tener en cuenta cierto tipo de criterios y se pueden clasificar los filtros de la siguiente manera:

- ✓ Según la fuerza impulsora para hacer pasar el agua por el filtro:
 - a) filtros de gravedad
 - b) filtros a presión
- ✓ Según la estructura:
 - a) abiertos: el agua está a presión atmosférica, suelen ser de hormigón, en algunos casos se pueden cubrir
 - b) cerrados: suelen ser presurizados, se utilizan materiales metálicos.
- ✓ Según el lecho:
 - a) lecho mono capa: se utiliza un sólo material; casi siempre se coloca arena silícea; en el fondo del lecho, sobre el falso fondo, se suele colocar una subcapa de grava

b) filtro multicapa: consiste en disponer diferentes materiales en capas. Existen varias posibilidades en función del objetivo perseguido. Si lo que se busca es que el filtro se ensucie homogéneamente habrá que colocar capas de diferentes tamaños eficaces: en las superiores tallas efectivas mayores y en el fondo las menores. Las partículas más gruesas se van a quedar en superficie, pero el resto del lecho va a retener de forma progresiva el resto de los tamaños. El filtro se ensucia de forma global y de esta forma la carrera puede ser mayor. El problema surge cuando hay que realizar el lavado.

✓ Según el flujo:

a) de flujo descendente: es la tipología normal

b) de flujo ascendente: esta modalidad tiene la ventaja de que se puede construir un filtro multicapa con un solo material, ya que los tamaños gruesos son los que van a estar en el fondo del lecho, que es por donde accede el agua bruta en este caso.

✓ Según la metodología de lavado:

a) sólo con agua en flujo ascendente o descendente

b) agua y aire, en flujo ascendente o descendente: el aire produce una gran turbulencia y fuerzas de tipo cortante que facilitan el desprendimiento de la suciedad; se puede introducir primero el aire y posteriormente el agua, o hacerlo de forma conjunta

c) lavado superficial: el lavado puede hacerse más intenso en superficie, que es donde se puede haber acumulado más suciedad, mediante lanzas de chorro de agua (*Tejero, 2015*).

3.9. Cloración

El uso del cloro como agente desinfectante empezó a principios del siglo XX y pasó a completar el proceso de filtración, que ya era ampliamente utilizado. Los productos de la familia del cloro más habituales para realizar la desinfección del agua son: cloro gaseoso, hipoclorito sódico, hipoclorito cálcico. El cloro (Cl_2) es un gas tóxico, más denso que el aire, de color verde amarillento. En presencia de humedad es extremadamente corrosivo y por ello los conductos y los materiales en contacto con él han de ser de aleaciones especiales. El vapor de cloro es irritante por inhalación y puede causar heridas graves en caso de exposición a altas concentraciones. El manejo de cloro se ha de realizar pues, por parte de personal especializado y son necesarios sistemas de control y de alarma muy efectivos. Por estos motivos, es preferible la utilización de hipocloritos en solución o en forma sólida.

El hipoclorito sódico (NaClO) en solución es un desinfectante que se utiliza desde el siglo XVIII y que popularmente se conoce como lejía. A nivel industrial se obtiene por reacción del cloro gas con una solución de hidróxido de sodio. Tras la reacción, se obtienen soluciones acuosas de color amarillo verdoso, que tienen una concentración determinada de cloro activo por litro. Se comercializa en disoluciones de concentraciones entre 3 y 15% en peso. Es un oxidante muy potente e inestable, tanto, que una solución de 100 gramos de cloro activo por litro, después de ser almacenada durante 3 meses, puede contener 90 gramos o incluso menos.

El hipoclorito cálcico ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) es un sólido blanco con contenido entre el 20 y el 70% de cloro activo. Sin embargo, presenta dos ventajas respecto al hipoclorito sódico: su mayor contenido en cloro y su mayor estabilidad. Para ser utilizado, se diluye con agua para obtener una solución de concentración más manejable, por ejemplo 2%.

El ácido hipocloroso es un desinfectante mucho más eficaz que el ion hipoclorito, este hecho podría estar relacionado con la inexistencia de carga en la molécula de ácido hipocloroso. Al ser una molécula neutra, le sería más fácil penetrar la pared bacteriana con la consiguiente actividad bactericida. A partir de este hecho, y teniendo en cuenta lo visto hasta ahora, es fácil entender la diferente actividad del hipoclorito como agente bactericida a diferentes valores de pH. Así, a pH por debajo de 7.5 la cantidad de hipoclorito para desinfectar agua es mucho menor que la necesaria para esa misma agua a pH superior a 7.5. Además de su aplicación como desinfectante, el cloro y sus derivados han demostrado ser útiles también en:

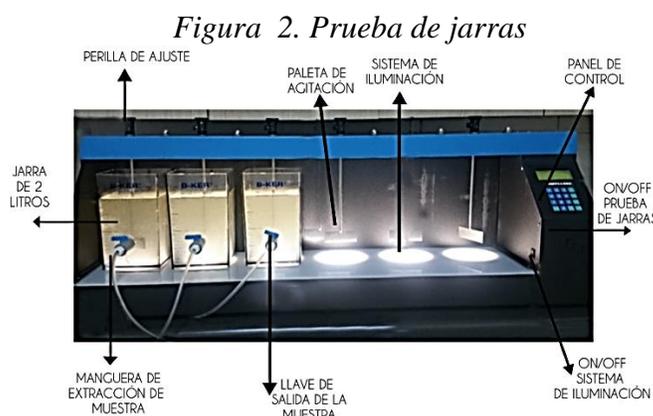
- Control de olores y sabores
- Prevención de crecimiento de algas
- Eliminación de hierro y manganeso
- Destrucción de ácido sulfhídrico
- Eliminación de colorantes orgánicos
- Mejoras en la coagulación por sílica

La cloración es correcta siempre que nos encontremos en valores de cloro residual superiores a los del punto de ruptura (que coinciden aproximadamente con los valores de cloro residual libre). Las cantidades de cloro libre residual recomendadas por los organismos competentes para aguas potables oscilan entre 0.5 y 1.0 ppm y entre 1.5 y 3.0 ppm para piscinas. No obstante, se trata de cloro libre, es decir, esta cantidad no es el cloro añadido, puesto que parte de éste se ha consumido por sustancias presentes en el agua (Central, 2012).

3.10. Prueba de jarras

La selección de productos químicos y la cantidad a utilizar en determinado proceso es un paso importante en el tratamiento de aguas. Se debe identificar las concentraciones con las que el proceso y el sistema funcionen de manera óptima; es decir, obtener eficiencias adecuadas a menores costos, para lo cual se realizan ensayos de dosificación a escala laboratorio a través de equipos como la Prueba de Jarras (Casanova, 2012). Las pruebas de Jarras se han creado para 2 fines básicamente; primero como herramienta para diseñar una planta de agua potable y finalmente como simulador, para determinar en laboratorio las dosis de insumos químicos que deben aplicarse en una Planta ya existente a fin de lograr cambios favorables en la calidad del agua (Navarro. Natalia, 2015).

El equipo de prueba de jarras contiene seis paletas de agitación que mezclan el contenido de jarras, de volumen constante de uno o dos litros, a una misma velocidad de mezclado para todos los recipientes son controlados por un medidor de revoluciones en RPM. Por lo general uno de los envases actúa como control, o patrón mientras que las dosificaciones restantes son diferentes. Se tiene un sistema de iluminación que permite observar de mejor manera los parámetros visuales que nos proporciona la prueba (como la formación de floc o partículas del carbón activado). Los elementos de este equipo se pueden observar en la *figura 2*.



Fuente: Autor

La Universidad Pontificia Bolivariana cuenta con cuatro equipos de Prueba de Jarras Phipps & Bird con panel digital y programación secuencial. El panel de control es en donde se programa los intervalos de tiempo y velocidades de mezcla, por lo general la mezcla lenta corresponde de 0 a 35 RPM mientras que la mezcla rápida va desde las 30 a 300 RPM. La tecnología de este equipo nos permite programar secuencialmente las tres etapas (pre tratamiento, coagulación, floculación y reposo para sedimentación), pero también existen algunos equipos en donde el control aún es de tipo manual y por etapas.

3.11. Puntos de aplicación del CA

A continuación, se ilustra los puntos más convenientes basados en artículos científicos, los cuales se tomaron como referencia para el ensayo a escala de laboratorio.

Tabla 3. Referencias bibliográficas de puntos de aplicación de carbón activado en PTAP.

TITULO	AUTORES	PUNTO DE APLICACIÓN RECOMENDADO
The application of powdered activated carbon for mib and geosmin removal: predicting CA doses in four raw waters	(Cook et al., 2001)	Flocculation
Pilot study of drinking water treatment with GAC, O3/BAC and membrane processes in Kinmen Island, Taiwan	(Yang, Yuan, & Weng, 2010)	Coagulation Flocculation
Effect of NOM and Lime Softening on Geosmin Removal by CA	(Reviewed, 2017)	Pre-tratamiento
Interference of iron as a coagulant on MIB removal by powdered activated carbon adsorption for low turbidity waters	(Filho, Seckler, Margarida, & Rosemeire, 2013)	Pre-tratamiento
Removal of natural metabolites using activated carbon organic material and algal	(Newcombe, 2006)	Coagulación Floculación

Fuente: Autor

4. METODOLOGÍA

4.1. Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica consistió inicialmente en determinar las concentraciones adecuadas de Geosmina (GSM) y 2-Metilsoborneol (MIB) a aplicar al agua a experimentar; así como también determinar las concentraciones de carbón activado en polvo (CA), como agente eliminador del sabor en el agua tratada, como se muestra en la *Tabla 1* del marco teórico se muestran algunos artículos científicos donde se evidencian las concentraciones utilizadas en los estudios realizados, y de cuales se tomarán como referencia para la realización de este ensayo a escala de laboratorio.

Seguido a esto, se realizó la revisión de documentación bibliográfica basada en los puntos del tren de tratamiento del agua en las PTAP, en donde se realiza y se recomienda frecuentemente aplicar el carbón activado en polvo (CA), para disminuir el sabor causado por las floraciones algales. Observar *tabla 2*. Lo anterior, con el fin de determinar cuál de los puntos del proceso de tratamiento del agua, la cual fue suministrada por la PTAP de Bosconia, será la más indicada para realizar la aplicación del CA y garantizar la eliminación del sabor en el agua.

4.2. Diseño experimental desarrollado

4.2.1. Unidad experimental

La unidad experimental es la base fundamental para cualquier tipo de investigación empírica y para el diseño experimental de esta. En este proyecto la unidad escogida para este tipo de proyecto se basó en la prueba de jarras, ensayo que ha sido ampliamente usado con resultados

de gran aplicabilidad en el diseño y la operación real de unidades de tratamiento de agua, así como en la optimización de plantas existentes.

Esta unidad la componen seis jarras que se encuentran dentro del sistema de test de jarras; cada una de estas jarras contenía el volumen de agua a tratar, el cual fue de 1 litro; como también la dosis óptima de concentración de algas Geosmina y MIB, y concentración definida del carbón activado.

4.2.2 Variables dependientes e independientes

El diseño experimental realizado se basó en un tipo de experimento al azar, en el cual, se definieron variables tanto dependientes como independientes; las primeras constaron de variables respuesta como pH, conductividad, turbiedad, color y principalmente sabor; por su parte las segundas, se relacionaron con variables que permanecieron constantes durante el desarrollo del ensayo, como lo fueron las concentraciones de carbón activado, geosmina y MIB y puntos de aplicación.

4.2.3 Factores y niveles

Así mismo el diseño experimental cuenta con factores de tratamiento y niveles desencadenados de estos factores de tratamiento (*Ver Figura 3*). Los factores definidos se basaron en las variables que se investigaron en el experimento como lo son el CA, concentración de geosmina-MIB y punto de aplicación de estas, con el fin de observar la afectación o influencia en las variables respuesta. Los niveles por su parte fueron los grados o las repeticiones que se realizaron en el experimento.

El primer factor del tratamiento fue la concentración de carbón activado que constó de nueve niveles, es decir nueve concentraciones diferentes, las cuales se muestran en la tabla 3. Por

otro lado, el factor dos, consistió en los puntos de aplicación de carbón activado (CA), determinados a partir de las diversas fuentes bibliográficas consultadas (*Ver tabla 2*); donde como resultado, se obtuvo que dicha aplicación será llevada a cabo al inicio tanto del pretratamiento como de la coagulación, y a la mitad del proceso de floculación. Para un total de tres niveles en los cuales se le aplicara el carbón activado como geosmina y MIB.

Tabla 4. Dosis de carbón activado aplicadas

CONCENTRACIONES	[] CARBON ACTIVADO mg/L
1	Patrón
2	2
3	4
4	7
5	10
6	15
7	20
8	30
9	40

Fuente: Autor

El tercer factor es la concentración de geosmina y MIB el cual se trabajó con un número de cuatro niveles es decir cuatro concentraciones diferentes (*Ver tabla 4*) aplicadas tanto al pretratamiento como coagulación y floculación.

Tabla 5. Dosis aplicadas de GSM y MIB

CONCENTRACIONES	[] MIB	[] GEOSMINA
X	6,5ng/L	1,5ng/L
Y	10ng/L	10ng/L
Z	50ng/L	50ng/L
K	150ng/L	150ng/L

Fuente: Autor

Para efectos de mayor entendimiento en la *Figura 3* se ilustra explícitamente lo mencionado anteriormente.

Donde:

[] (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) CA = Concentración de carbón activado por niveles factor 1.

I_{pre} = Punto de aplicación al iniciar la etapa del pretratamiento Factor 2.

I_{co} = Punto de aplicación al iniciar la etapa de coagulación. Factor 2.

M_{floc} = Punto de aplicación en la mitad de la etapa de la floculación Factor 2.

GM_x = Concentración 1 de geosmina y MIB Factor 3.

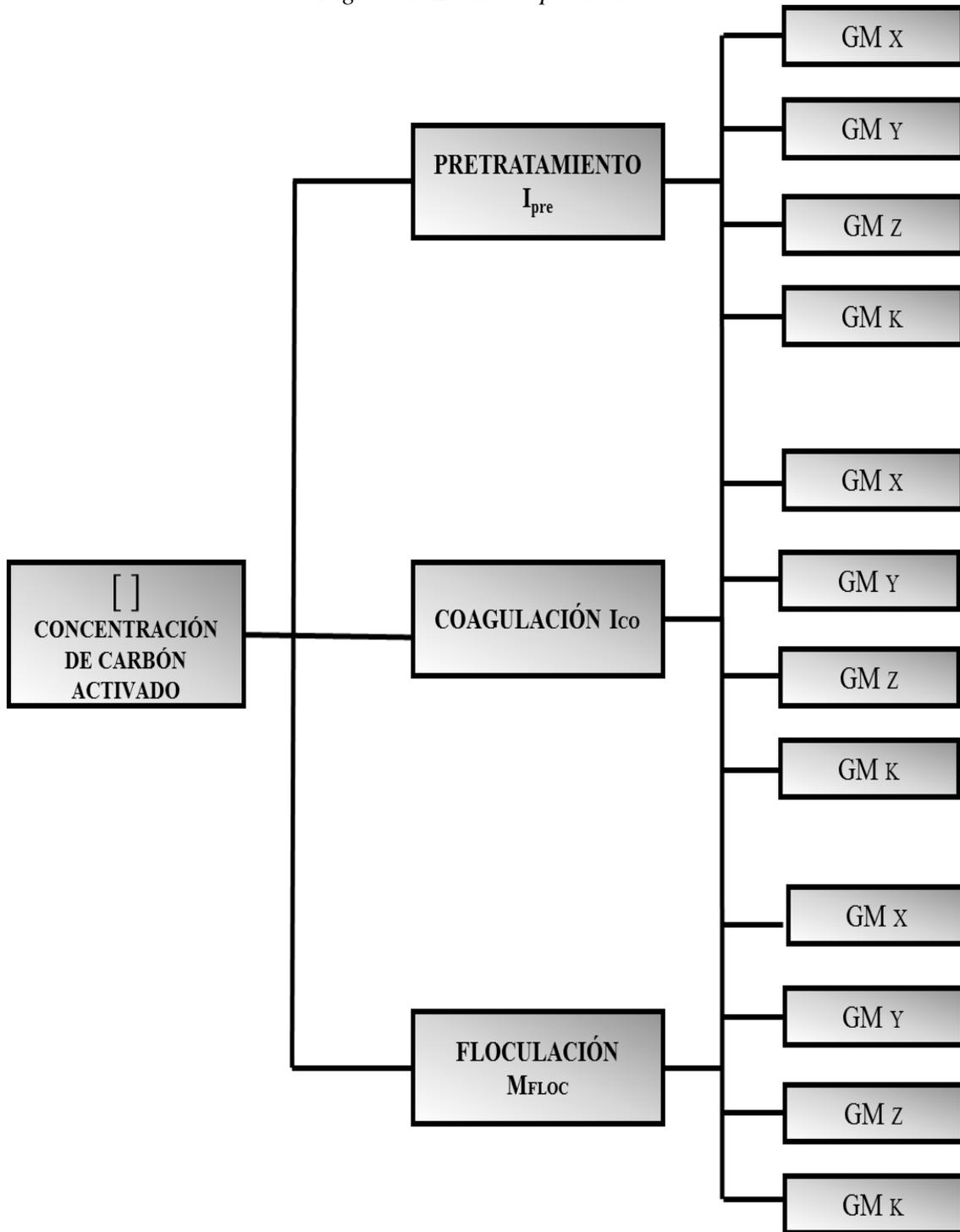
GM_y = Concentración 2 de geosmina y MIB Factor 3.

GM_z = Concentración 3 de geosmina y MIB Factor 3.

GM_k = Concentración 4 de geosmina y MIB Factor 3.

Como se puede observar en la *Figura 3*, el proceso que se llevó a cabo en el test de jarras constó de un total de doce tratamientos, los cuales se repitieron nueve veces; para un total de 108 tratamientos realizados a escala de laboratorio.

Figura 3. Diseño experimental



Fuente: Autor

4.3. Implementación del diseño experimental

4.3.1. Toma de muestras

Para iniciar con el proceso de tratamiento se llevó a cabo una visita previa a la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia (PTAP), con el fin de llevar a cabo la toma de muestras de los diferentes procesos del tratamiento. Es así que se tomaron dos muestras de agua, la primera al inicio del pretratamiento, la segunda a la entrada de la planta para evaluar la coagulación y floculación estas últimas dos evaluaciones no se les hizo proceso de tratamiento. Las muestras se almacenaron en garrafas de polietileno con volúmenes de 20 litros, las cuales fueron trasladadas a la Universidad Pontificia Bolivariana para dar inicio a la implementación del diseño experimental elaborado, por medio del test de jarras.

4.3.2. Equipos y materiales utilizados

4.3.2.1 Equipos

Los equipos utilizados para la medición de parámetros físico químicos del agua se muestran en la siguiente tabla (*Ver tabla 5*).

Tabla 6. Equipos utilizados

EQUIPO	MARCA	UNIDAD DE MEDIDA
Potenciómetro	HQ40d	pH
Conductímetro	HQ40d	µs/cm
Turbidímetro	HACH 2100Q	UNT
Espectrofotómetro	DR 500	UPC
Test de jarras	PHIPPS&BIRD	RPM

Fuente Autor

4.3.2.2 Materiales

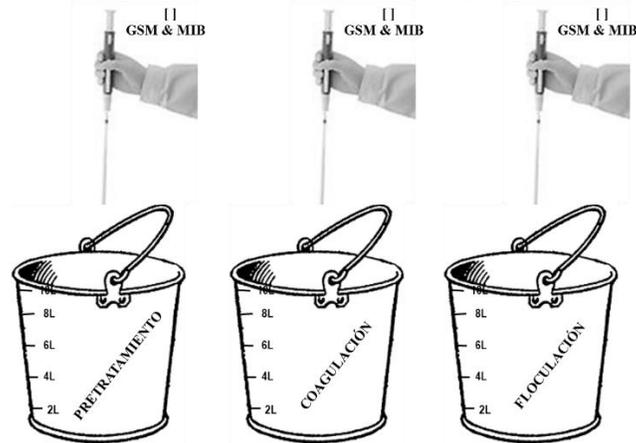
Los materiales utilizados para la realización de los ensayos a escala de laboratorio fueron los siguientes:

- ✓ Gravilla
- ✓ Arena
- ✓ Antracita
- ✓ Dosis madre de geosmina y MIB
- ✓ Carbón activado en polvo
- ✓ Sulfato de aluminio
- ✓ Vasos plásticos
- ✓ Cubetas de polietileno de 10 litros
- ✓ Garrafas de polietileno de 20 litros
- ✓ Cronómetros
- ✓ Jeringas

4.3.3. Montaje de la unidad experimental

El primer paso del montaje que se llevó a cabo fue, traspasar el agua tomada de los diferentes puntos del tren de tratamiento de la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, de las garrafas de 20 litros a cubetas de 10 litros, donde se llevó a cabo la aplicación de las dosis madre de Geosmina y MIB como se muestra en la *Figura 4* con las concentraciones establecidas (*Tabla 4*). Añadidas las dosis madre de las algas al agua (son metabolitos sintéticos), se procedió con la toma de parámetros fisicoquímicos iniciales como base de referencia para el tratamiento final del agua a realizar. Los parámetros fisicoquímicos medidos correspondieron a pH, conductividad, turbiedad y color.

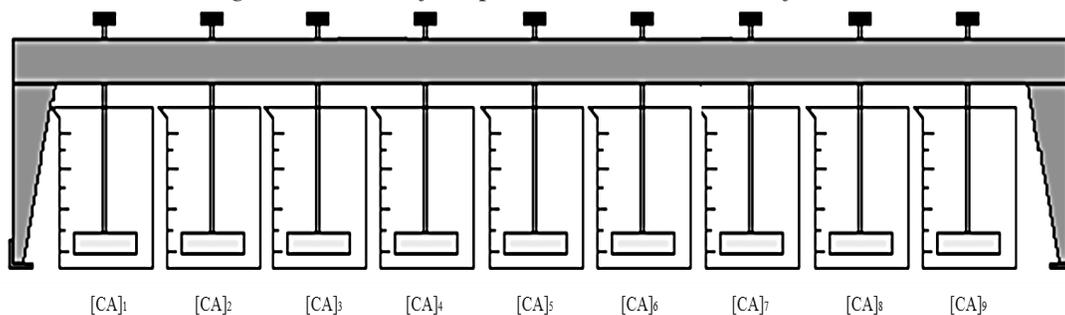
Figura 4. Preparación de muestras de agua por tratamiento.



Fuente: Autor

Los test de jarras se prepararon previo a la medición de los parámetros fisicoquímicos, añadiendo un litro de agua de cada uno de los tratamientos a las jarras. Las corridas experimentales estaban compuestas por las nueve concentraciones diferentes de carbón activado en el agua de los tres tratamientos (Pre-tratamiento, coagulación y floculación) y con las cuatro concentraciones de la mezcla de Geosmina y MIB como se evidencia en la Figura 5 que corresponde al montaje del diseño experimental, para un total de 108 tratamientos.

Figura 5. Montaje experimental en el test de jarras.



Fuente: Autor

Dependiendo del tratamiento a llevar a cabo a escala laboratorio, se manejaron los tiempos y revoluciones por minuto establecidos actualmente en la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia (Ver Tabla 7).

Tabla 7. Tiempos y Revoluciones por minuto aplicados a los tratamientos

TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRAULICA (min) –POR UNA SOLA LÍNEA DE CONDUCCIÓN – SIMULACIÓN PARA UN CAUDAL DE 1 m ³ /s										
Estructura	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)	Vol (m ³)	TRH (min)	Simulación en el laboratorio				
Canaleta parshal	-	-	-	-	1	Mezcla rápida	300 RPM			
Desarenador	4	14,7	3,4	199,92	3	Cono Imhof	0 RPM			
Presedimentadores	14	44,1	2,5	1543,50	26	Cono Imhof	0 RPM			
Floculadores	12	12	5,4	777,6	26	M. Lenta – 1L	50	37	38	25
						M. Lenta – 2L	39	28	29	19
Sedimentadores	12	24	3,5	1008	34	Jarra	0 RPM			
Cloración – 1 mg/l	-	-	-	-	30	Frasco oscuro	0 RPM			

Fuente: Autor

Se aclara que el estudio de cada muestra de agua tomada de los procesos de tratamiento se realizó de forma independiente, es decir, las muestras que correspondían al pretratamiento se le adicionó el carbón activado iniciando la mezcla rápida del proceso; seguido a esto se realizó una pre sedimentación por medio de una simulación en conos imhoff, para así continuar con el proceso de coagulación donde se adicionó Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) como coagulante. Llevada a cabo la floculación y sedimentación se prosiguió con la filtración por medio de los filtros elaborados con gravilla, arena y antracita; finalizando con la desinfección por medio de la aplicación de cloro en pequeñas concentraciones de 1 mg/L

Para las muestras de agua tomadas en los procesos de coagulación y floculación de la PTAP de Bosconia se omitió la pre sedimentación como subproceso del pretratamiento; como también se modificaron los puntos de aplicación de carbón activado, se aplicó coagulante al inicio de la mezcla rápida y el carbón finalizando la mezcla rápida por lo que en la coagulación se aplicó al inicio de ésta en compañía del Sulfato de Aluminio, y en la

floculación a la mitad del proceso. Estas etapas del tratamiento prosiguen de igual forma con el proceso de sedimentación, filtración y cloración.

Cabe aclarar que el coagulante agregado al agua, Sulfato de Aluminio Tipo B ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) se determinó de acuerdo a que es el de mayor comercialización por ende los costos son relativamente bajos. El coagulante empleado viene en varias presentaciones como polvo, granulado, escamas y solución; este último fue el empleado para las pruebas en una concentración de 3mg/L por jarra de tratamiento dosis óptima dada por el acueducto, según las características del agua.

4.4. Evaluación del efecto de la aplicación de carbón activado en el tratamiento del agua

Realizadas las corridas experimentales de acuerdo al diseño implementado, se llevó a cabo la evaluación del sabor del agua teniendo en cuenta el efecto de la aplicación de las diferentes concentraciones de carbón activado. Dicha evaluación se efectuó por medio de cataciones realizadas por estudiantes al azar de la Universidad Pontificia Bolivariana, y mediante el diligenciamiento de un formato de calificación de parámetros (*Ver tabla 8*), el cual tenía como fin determinar si el agua tratada poseía algún tipo de sabor. Si la respuesta de los participantes de la prueba era sí, procedían a marcar que tipo de intensidad poseía el agua, marcando con una x entre las tres opciones (Baja, media, alta); después se indicaba el tipo de sabor del agua forma cualitativa, según el criterio del participante, si el catador no percibía ningún sabor marcaba con una x él “No sabe”, y continuaba con la siguiente muestra. Cada catador se le dio una cantidad de nueve muestras de diferentes etapas del proceso para lograr una aleatoriedad en los resultados.

Tabla 8. Formato de Catación de agua tratada

NO SABE	SI SABE	SABOR			TIPO DE SABOR
		INTENSIDAD BAJA	INTENSIDAD MEDIA	INTENSIDAD ALTA	

Fuente: Autor

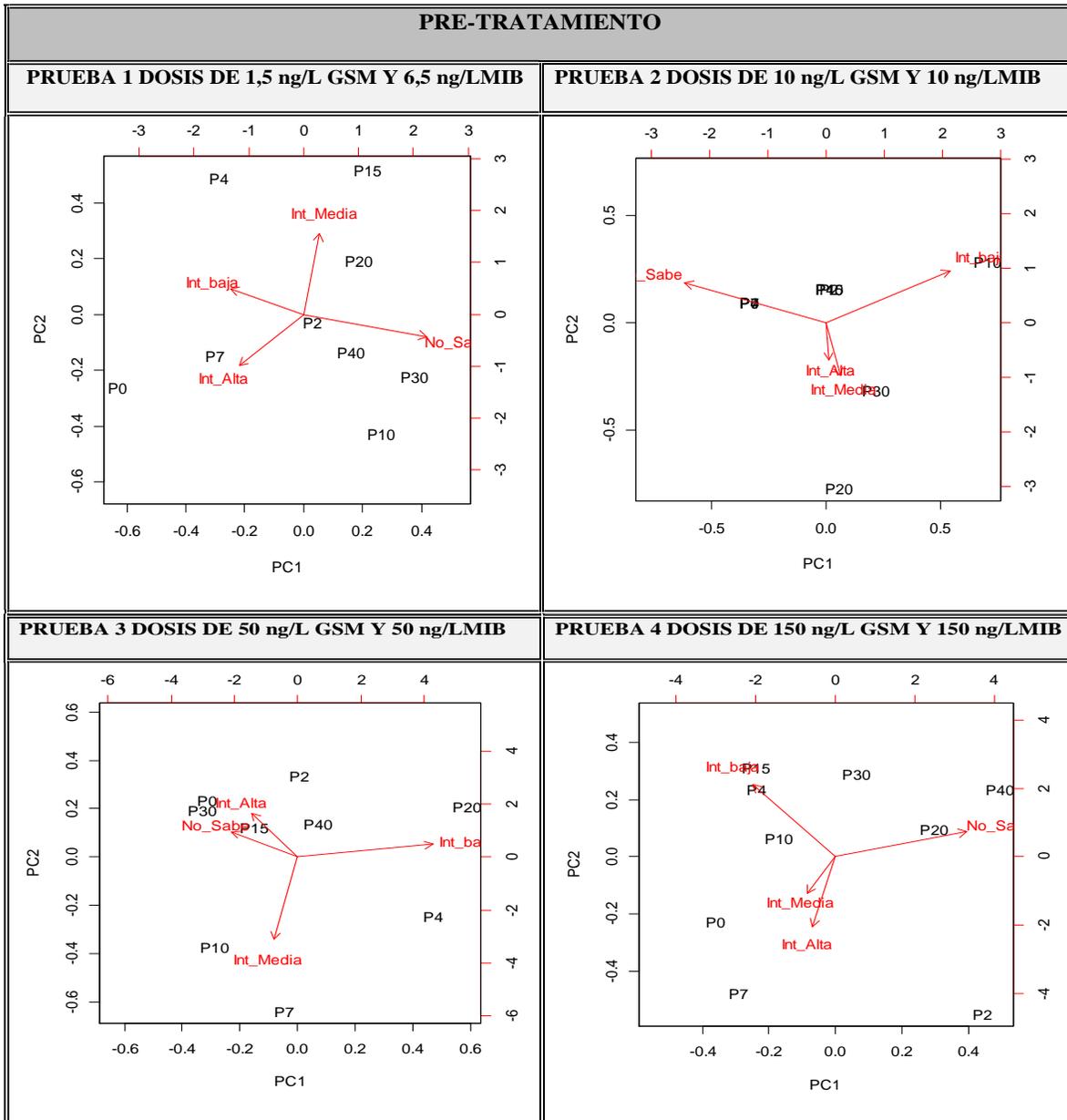
Tabulados los resultados de las cataciones se procedió a enviar estos a la persona encargada de llevar a cabo el análisis estadístico (Villamizar Maryory, 2018). Lo anterior con el fin de garantizar resultados precisos, seguros y confiables, mediante un software altamente utilizado para estudios científicos. El software R, permite la síntesis de los datos obtenidos mediante un análisis de componentes principales, como lo son en este caso las intensidades de los sabores obtenidos en la implementación del diseño experimental (Figura 3).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis del efecto de la aplicación de carbón activado en el tratamiento del agua

Realizado el análisis de Componentes Principales (ACP) como técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables) tomada por los formatos de las cataciones, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se evidencian en las Tablas 9, 10 y 11. También se puede comparar con los resultados obtenidos de catación mostrados en el Anexo 9.1.

Tabla 9. Resultados de catación de agua con aplicación de carbón activado en la etapa de pretratamiento.



Fuente: Doctora Estadística, Villamizar Maryory, 2018- programa estadístico R

Como se puede observar en la *Tabla 9* las dosis de carbón activado asignadas con la letra “P” y aplicadas en la etapa de pre-tratamiento en unidades de mg/l, se encuentran dispersas alrededor del espacio vectorial de las intensidades de sabores, las cuales fueron percibidas

por estudiantes de la Universidad Pontificia Bolivariana; es decir dichos resultados arrojados son subjetivos ya que fueron obtenidos por catación.

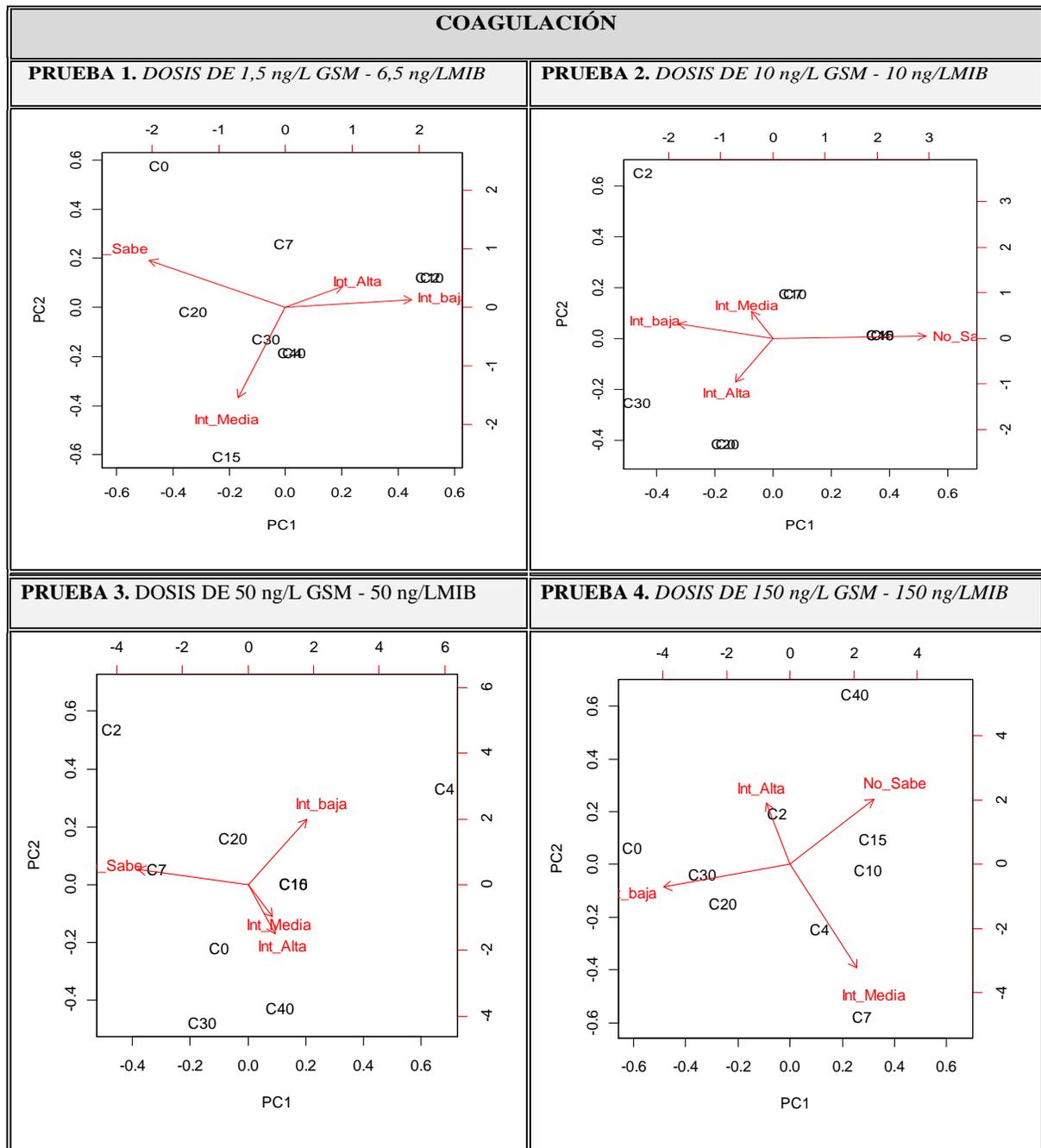
En cuanto a las pruebas realizadas, se ordenaron de menor a mayor concentración de geosmina y MIB, con valores que oscilaban de 1,5 ng/l a 150ng/l y de acuerdo al diseño experimental implementado.

En cuanto a la representación vectorial dada por las intensidades de sabores percibidas en el agua, en cada una de las pruebas, se mostró que los vectores con longitudes más extensas, es decir, con mayor respuesta de los catadores, se asoció al “No sabor” e “Intensidades bajas” con la aplicación de carbón activado al agua en el pre-tratamiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, se logró evidenciar que las dosis de carbón activado más favorables para lograr la eliminación de sabor en el agua causado por los metabolitos provenientes de las algas verde-azuladas (geosmina y MIB), correspondieron a las concentraciones más altas de CA, es decir, 20, 30 y 40 mg/l. Sin embargo, se observó que dichos resultados no dependían de las concentraciones madres de GSM y MIB, ya que la aplicación de carbón activado (concentraciones altas) removi6 de igual forma el sabor terromohoso del agua tanto en dosis altas como bajas en las pruebas evaluadas.

En cuanto a la prueba número 2, que corresponde a las dosis de 10ng/l de GSM y MIB, el sabor terromohoso fue de igual forma imperceptible “No sabe” y bajo. No obstante, las dosis de carbón activado aplicadas para lograr dicha remoción de sabor, se encontraban en rangos de 7mg/l a 10mg/l; lo cual demuestra la subjetividad en las cataciones, presentadas por diferentes factores como sabor del agua en el sector de residencia, y la cantidad de muestras degustadas.

Tabla 10. Resultados de catación de agua con aplicación de carbón activado en la etapa de coagulación.



Fuente: Doctora Estadística, Villamizar Maryory, 2018- programa estadístico R

Por otro lado, en la etapa de coagulación las pruebas arrojaron similitud de resultados entre la prueba 1 y 4, las cuales corresponden a la concentración más baja (1,5 ng/l de GSM y 6,5

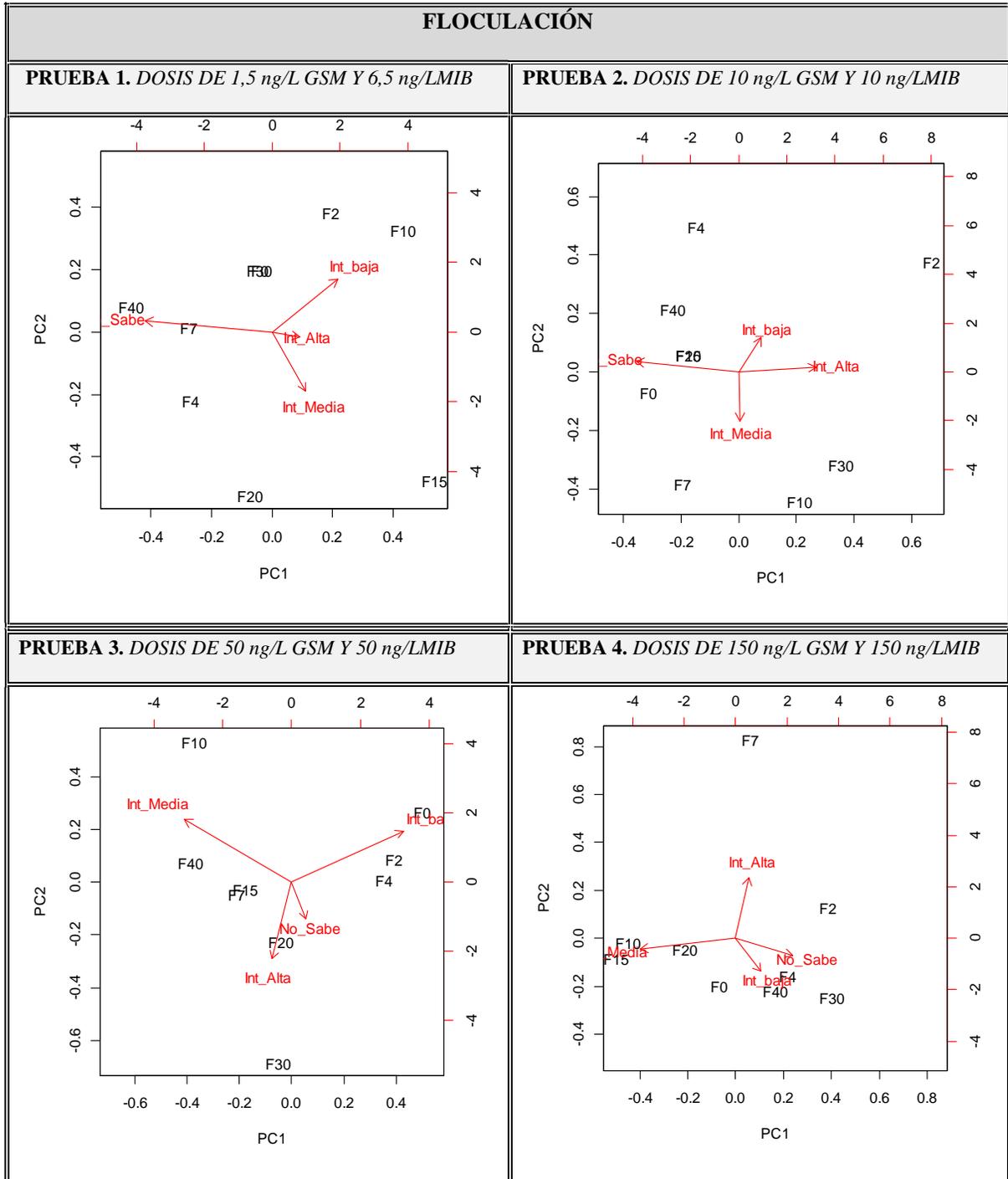
ng/l de MIB) y la más alta (150 ng/l de GSM y MIB) respectivamente; ya que los vectores de no presencia de sabor, intensidad baja e intensidad media se asemejan con la longitud de su distancia.

Para el caso de las pruebas 1 y 4, el sabor presenciado fue de intensidad baja y sin sabor; con concentraciones de CA aplicadas de 30 y 20mg/l, y 20mg/l y 15mg/l respectivamente. Lo que indica que en comparación con el proceso de pre-tratamiento, la dosis requerida para remover el sabor terro-mohoso del agua es menor, pero sigue sin tener relación con las concentraciones de geosmina y MIB analizadas.

En cuanto a las pruebas 2 y 3 se observa que no se presenta correlación en las dosis aplicadas de CA; sin embargo, son dosis relativamente bajas y coinciden con presencia de sabor baja en el agua tratada, donde se aplicó el carbón activado al inicio de la etapa de coagulación. Las concentraciones de CA en las que no se logró percibir sabor del agua en los catadores fueron 15 y 40mg/l, y 7mg/l para las pruebas 2 (10ng/l de GSM y MIB) y 3 (50ng/l de GSM y MIB) respectivamente.

Analizados los resultados presentados en la coagulación de acuerdo al sabor en el agua, se deduce que agregar simultáneamente el coagulante con bajas concentraciones de carbón activado, reduce el sabor en el agua. Lo anterior teniendo en cuenta que según (Filho et al., 2013), se incrementa el contacto con los compuestos orgánicos que causan el sabor, ya que el CA se incorpora con los hidróxidos metálicos formados en la coagulación, lo que finalmente genera el floc que retiene gran cantidad de los metabolitos, geosmina y MIB.

Tabla 11. Resultados de catación de agua con aplicación de carbón activado en la etapa de floculación.



Fuente: Doctora Estadística, Villamizar Maryory, 2018- programa estadístico R

En la etapa de floculación, los resultados después de realizada la catación arrojaron que la aplicación de carbón activado no tiene importancia sobre la remoción de sabor en el agua tratada, ya que como se puede ver en la *Tabla 11* las dosis de CA se encuentran dispersas en el espacio vectorial de intensidades de sabores. Lo anterior, observando que en la prueba 1, las concentraciones de CA que evidenciaron remoción de sabor en el agua fueron 40mg/l y 7 mg/l, las cuales son totalmente opuestas entre sí. Así mismo, la prueba 2 mostró que el sabor era imperceptible con aplicación de carbón activado en polvo en concentraciones de 20mg/l y 0mg/l, lo que es erróneo pues, la concentración de 0mg/l de CA es la muestra patrón y debería presentar un mínimo de sabor terro-mohoso. Por ultimo las pruebas 3 y 4 no reportaron valores de concentraciones óptimas para la eliminación del sabor.

Se presume que la no remoción del sabor en el agua en el proceso de floculación, ocurrió debido a que la aplicación de CA se realizó en la mitad del proceso, en el cual se realiza una mezcla de tipo lenta (35 RPM); lo cual no es adecuado para aglomerar las micropartículas de sabor (GSM y MIB) con las de carbón activado, porque se necesita promover la colisión mediante movimientos caóticos para que se puedan enlazar entre sí todas las partículas. Además, en la mitad del proceso de floculación ya se ha formado gran cantidad de floc, lo que hará que el CA entré en contacto con los flóculos y no con las micropartículas de geosmina y MIB.

5.2. Remoción de GSM y MIB

Con el fin de complementar los Análisis de Componentes Principales ACP, se realizó un estudio de remoción de sabor, es decir remoción de los metabolitos de GSM y MIB en el agua. Dicho estudio llevado a cabo en la Universidad Industrial de Santander (UIS), mediante la determinación de 2-Metlisoborneol (MIB) y geosmina en matrices acuosas por

cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas operada en el modo de monitoreo de ion(es) seleccionado(s) (GS-MS/SIM), se basó en muestras de agua tomadas tanto de la etapa del pre tratamiento como de floculación de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Bosconia; con el fin de conocer el porcentaje de remoción exacto y dar una respuesta lo más cercana posible para la solución del problema de sabor presentado.

Los puntos de agua escogidos del tren de tratamiento (Pretratamiento y floculación) para realizar el análisis de remoción, fueron seleccionados de acuerdo a los resultados obtenidos por las cataciones realizadas en el Laboratorio de Agua Potable de la universidad Pontificia Bolivariana; en los cuales se evidenció que los índices más altos de no presencia de sabor en el agua estaban relacionados con el Pretratamiento, en contraste con la etapa de floculación la cual representó el punto menos compatible para la asimilación del carbón activado y posterior remoción de sabor del agua. Actualmente, la planta de tratamiento de Bosconia adiciona el carbón activado en la etapa de floculación; es así que a continuación se muestra en la tabla 12 y 13 los índices de remoción del pre tratamiento y floculación.

Tabla 12. Resultados de Masa removida de GSM y MIB con Aplicación de CA en el Pretratamiento

MUESTRA	GSM [ng/l]	MASA REMOVIDA GSM [ng]	% DE REMOCIÓN GSM	MIB [ng/l]	MASA REMOVIDA MIB [ng]	% DE REMOCIÓN MIB
Concentración inicial del agua	114	/	/	45	/	/
Pre tratamiento [2mg/l] CA	96	18	15,8	38	7	15,6
Pre tratamiento [5mg/l] CA	85	29	25,4	35	10	22,2
Pre tratamiento [8mg/l] CA	88	26	22,8	38	7	15,6

Fuente: UIS, 2018

Tabla 13. Resultados de Masa removida de GSM y MIB con Aplicación de CA en la floculación

MUESTRA	GSM [ng/l]	MASA REMOVIDA GSM [ng]	% DE REMOCIÓN GSM	MIB [ng/l]	MASA REMOVIDA MIB [ng]	% DE REMOCIÓN MIB
Concentración inicial del agua	114	/	/	45	/	/
Floculación [2mg/l] CA	92	22	19,3	38	7	15,6
Floculación [5mg/l] CA	90	24	21,1	40	5	11,1
Floculación [8mg/l] CA	89	25	21,9	39	6	13,3

Fuente: UIS, 2018

La Tabla 12 y 13 expresa índices muy bajos de masa removida en el pretratamiento, por ende, se confirma que los resultados del análisis de componentes principales son correctos, con dosis altas de carbón activado, es decir, rangos de 20, 30 y 40 mg/l es más eficaz la remoción de GSM y MIB. El estudio realizado por la UIS no manejó concentraciones de CA altas por dos razones; primero la planta de potabilización de Bosconia no utiliza dosis altas por problemas que derivarían en la colmatación de filtros, afectado la etapa de filtración del tratamiento, lo que implicaría un lavado constante de filtros y disminuiría la vida útil de los filtros. Segundo, la PTAP de Bosconia realiza la aplicación de carbón activado en la etapa de floculación, por esta razón se evaluaron estas dos etapas.

Los resultados obtenidos en remoción en las dos etapas son muy bajos no sobrepasan los 29 ng; no obstante, se puede observar que en el pretratamiento la remoción es más elevada con rangos que van desde 26 ng a 29 ng, ya que en la floculación los valores oscilan de 22 ng a 25 ng. Es por esto que se determina que la efectividad de remoción de sabor en el agua, se basa en dosis altas y mayor tiempo de contacto con el CA.

5.3. Evaluación del punto de aplicación del CA en el tren de tratamiento de agua potable

Teniendo en cuenta los resultados del análisis de componentes principales, mostrados en las tablas 8, 9 y 10 se pudo determinar que el mejor punto para la aplicación de carbón activado para lograr la remoción de sabor en el agua en el proceso de potabilización, es el pretratamiento. En las cuatro pruebas que tenían diferentes concentraciones de GSM y MIB el CA logró remover de mayor forma el sabor, los catadores no presenciaron éste en concentraciones que oscilaban entre 20, 30 y 40 mg/l de carbón activado. Además, estudios realizados demuestran que el contacto de agua con el CA debe tener un mínimo de contacto de 30 minutos, para que haya un equilibrio en la adsorción; lo que ayuda a las micropartículas de sabor fueran mayormente removidas en el pretratamiento con el cual se inicia el proceso de potabilización del agua (Zoschke et al., 2011).

5.4. Análisis de parámetros fisicoquímicos

Medidos los parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento se procedió a realizar un análisis comparativo de las variables para lograr identificar la efectividad o no del tratamiento, y la afectación de los parámetros en el agua.

Respecto al comportamiento del pH (*Ver Figura 6*), medido en los tres puntos de aplicación trabajados (pretratamiento-coagulación-floculación), se evidenció que no mostraron cambios significativos con respecto a los pH iniciales de las muestras (*Ver tabla 14*), manteniéndose en el rango de 8,7 a 8,9 unidades de pH, lo que demuestra que la adición de carbón activado no tiene influencia ni alteración en este parámetro. Así mismo, se constató

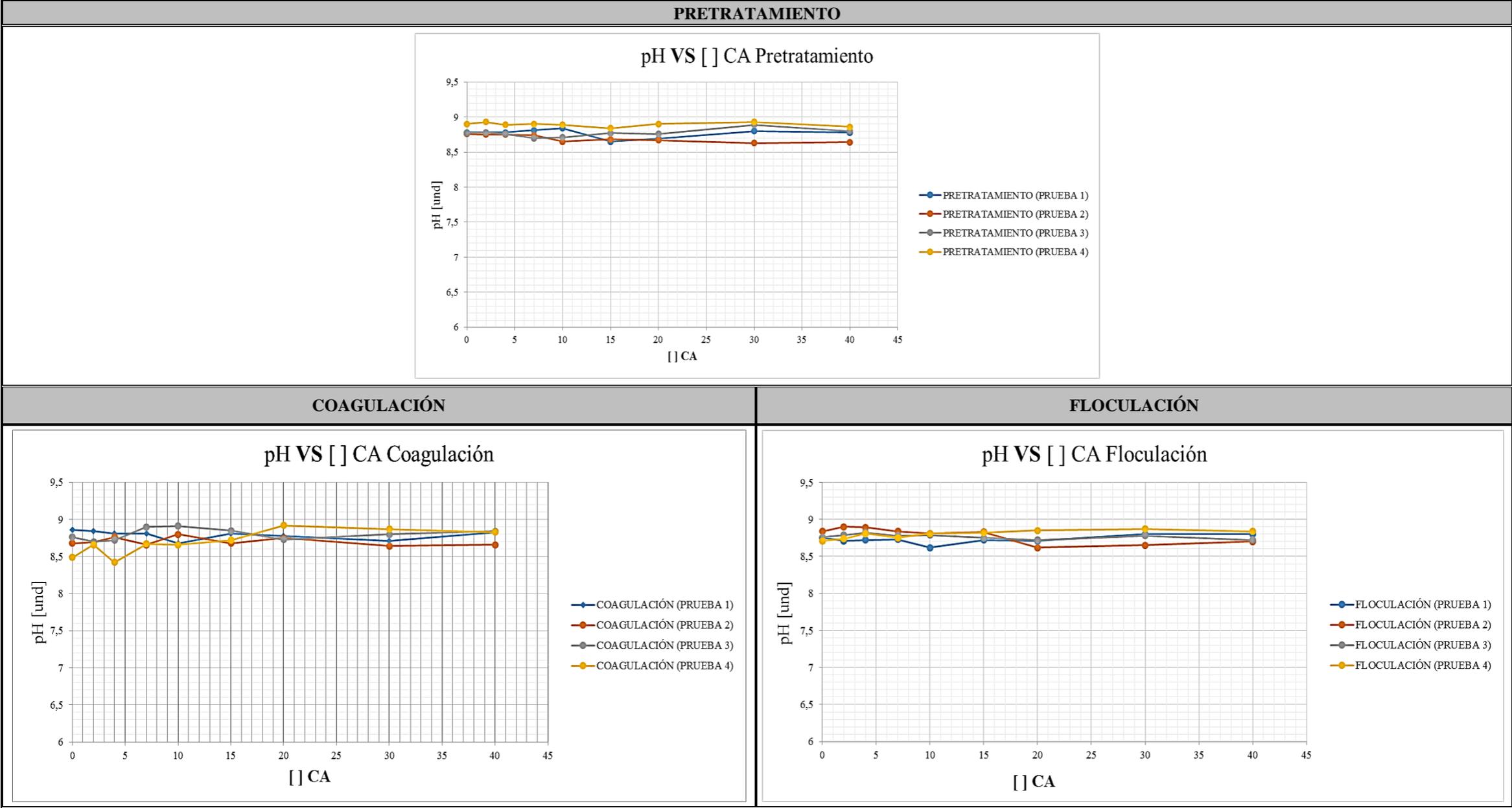
que el agua tratada se encontraba entre el rango permitido por el IRCA, el cual es de 6,5 a 9,0 unidades de pH (Garzón, 2015).

Tabla 14. pH inicial del agua

	N° PRUEBA	PRETRATAMIENTO	COAGULACIÓN	FLOCULACIÓN
PH INICIAL (Und)	PRUEBA 1 [GSM=1,5 ng/L y MIB=5,6 ng/L]	8,8	8,7	8,7
	PRUEBA 2 [GSM y MIB= 10 ng/L]	8,7	8,8	8,7
	PRUEBA 3 [GSM y MIB= 50 ng/L]	8,8	8,8	8,8
	PRUEBA 4 [GSM y MIB= 150 ng/L]	8,5	8,6	8,6

Fuente: Autor

Figura 6. Comportamiento del pH en el agua después de aplicado el CA



Fuente: Autor

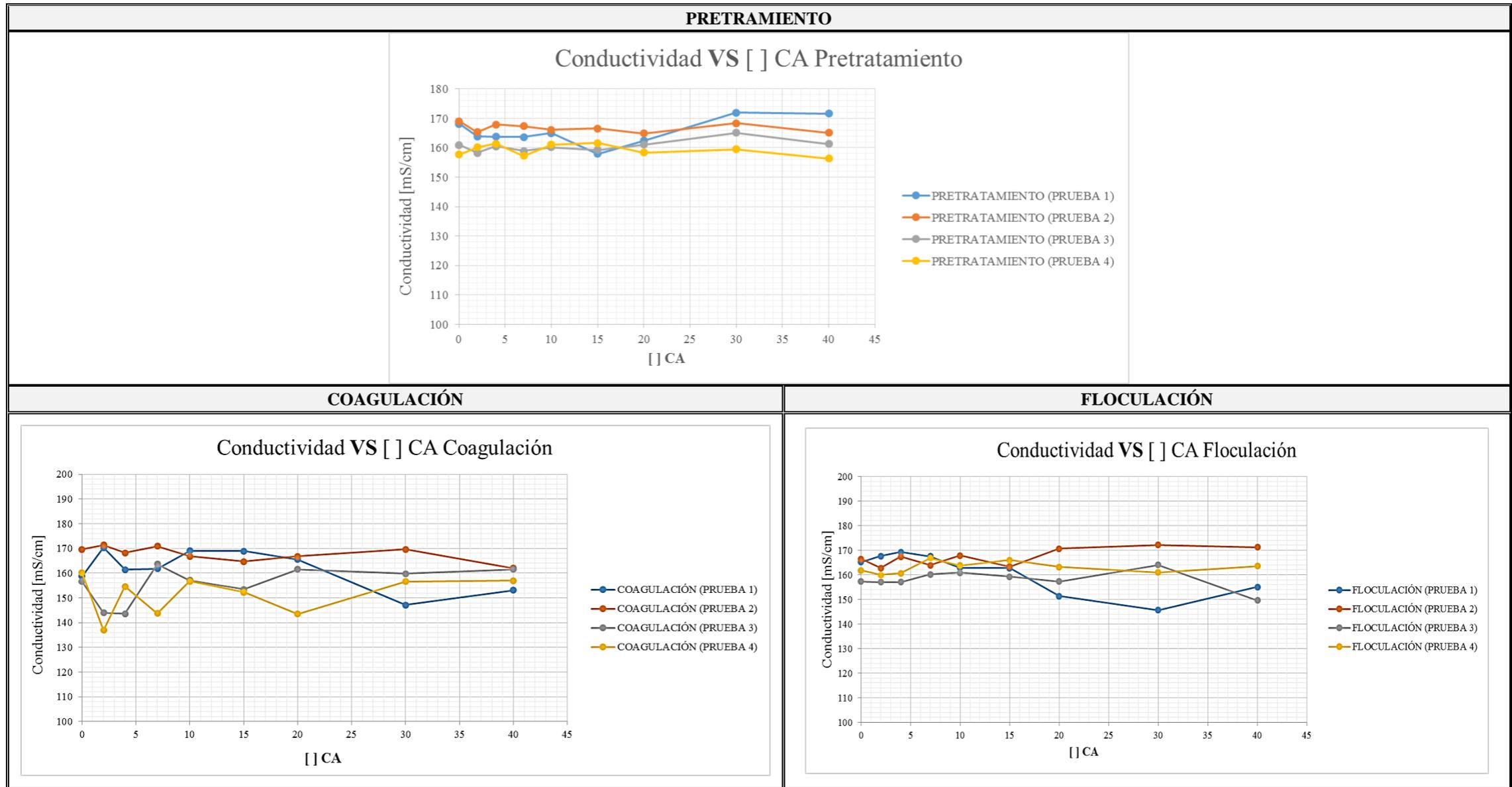
En cuanto al comportamiento del parámetro de conductividad, mostrado en la figura 7, donde se muestra la conductividad en microsiemens por centímetro con relación tanto a las dosis de carbón activado utilizadas y aplicadas en cada uno de los puntos del tren de tratamiento; como las pruebas con los agentes utilizados para simular el sabor terro-mohoso presentado en el agua de la PTAP de Bosconia. no se presencié un aumento representativo, lo que significa que el carbón activado en polvo no altera la presencia de iones en el agua, y logra mantener el rango de potabilidad, dado que se encuentra entre 50 y 1000 $\mu\text{s/cm}$.

Tabla 15. Conductividad inicial del agua

	N° PRUEBA	PRETRATAMIENTO	COAGULACIÓN	FLOCULACIÓN
CONDUCTIVIDAD INICIAL (Ms/cm)	PRUEBA 1 [GSM=1,5 ng/L y MIB=5,6 ng/L]	148,7	147,7	148,3
	PRUEBA 2 [GSM y MIB= 10 ng/L]	149,8	153,9	147,0
	PRUEBA 3 [GSM y MIB= 50 ng/L]	144,2	141,6	144,3
	PRUEBA 4 [GSM y MIB= 150 ng/L]	146,8	150,2	148,8

Fuente: Autor

Figura 7. Comportamiento de la conductividad en el agua después de aplicado el CA



Fuente: Autor

Los resultados de turbiedad mostrados en la Figura 8 arrojaron rangos muy variados en cada tratamiento de 0,57 a 7 UNT, los más óptimos se presentaron en el pretratamiento y coagulación con las dosis más altas de GSM y MIB a 150 ng/l, aunque en el pretratamiento se evidenció la mejor turbiedad con 0,57 UNT. Por otro lado, los rangos de turbiedad en su gran mayoría están por encima del RAS, el cual su valor debe ser 2 UNT o menor a este.

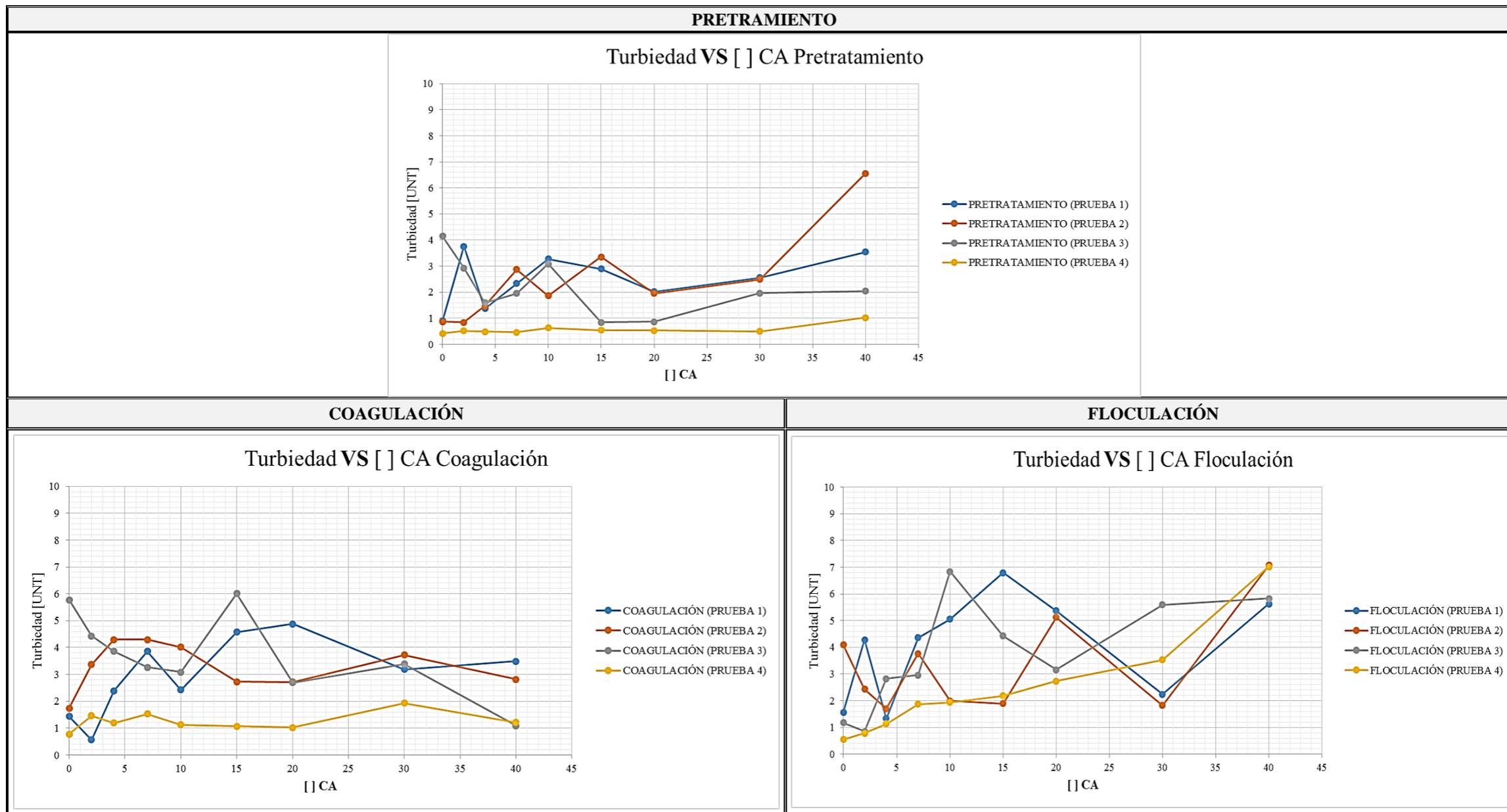
La turbiedad alta pudo estar influenciada tanto por los filtros debido a la reutilización en las pruebas del laboratorio, como la influencia de carbón activado en el tratamiento; se evidenció que, entre mayor contacto del CA con la geosmina y MIB, mejor los resultados de remoción de turbiedad, por lo cual, el pretratamiento, como fase inicial del proceso de potabilización obtuvo la turbiedad más baja.

Tabla 16. Turbiedad inicial del agua

	N° PRUEBA	PRETRATAMIENTO	COAGULACIÓN	FLOCULACIÓN
TURBIEDAD INICIAL (UNT)	PRUEBA 1 [GSM=1,5 ng/L y MIB=5,6 ng/L]	18,3	21,5	20,8
	PRUEBA 2 [GSM y MIB= 10 ng/L]	21,6	14,4	15,0
	PRUEBA 3 [GSM y MIB= 50 ng/L]	23,8	20,8	18,9
	PRUEBA 4 [GSM y MIB= 150 ng/L]	18,6	16,0	16,0

Fuente: Autor

Figura 8. Comportamiento de la turbiedad en el agua después de aplicado el CA



Fuente: Autor

Por otro lado, El color aparente tuvo una reducción significativa en todas las etapas del tren de tratamiento, inicialmente se presentaron valores que oscilaban entre los 26 a 57 UPC, y después de aplicado el carbón activado en polvo y terminado el tratamiento se obtuvieron valores de UPC de -5 a 25, la aplicación de CA en el inicio del pretratamiento fue la de mejor resultado obtenidos y a menores rangos de geosmina y MIB las otras concentraciones se mantuvieron en los estándares de color en el pretratamiento, aunque se tiene unas tendencias que a mayor concentraciones de CA el color tiende a aumentar. Se resalta que el CA y coagulante poseen un efecto de absorción de color, lo que ayudó a dar cumplimiento a los estándares recomendados por el Reglamento técnico de Agua Potable y Saneamiento básico (≤ 15 UPC).

Tabla 17. Color inicial del agua

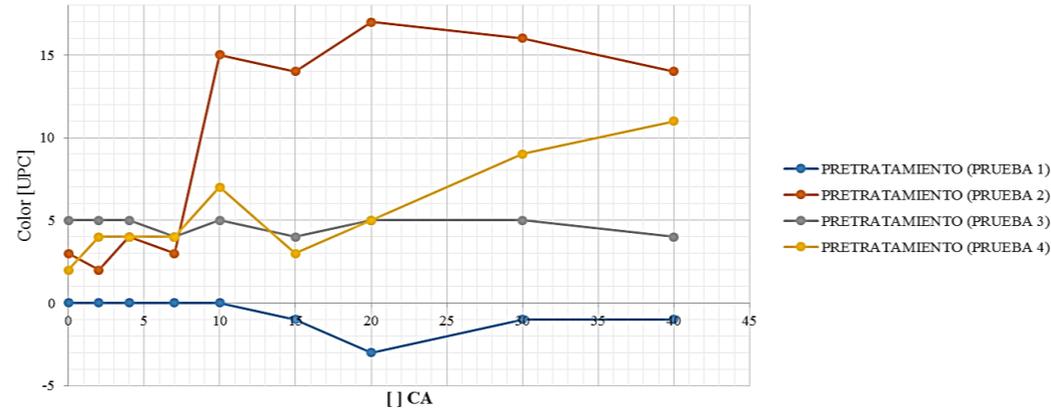
	N° PRUEBA	PRETRATAMIENTO	COAGULACIÓN	FLOCULACIÓN
COLOR INICIAL (UPC)	PRUEBA 1 [GSM=1,5 ng/L y MIB=5,6 ng/L]	57,0	46,0	48,0
	PRUEBA 2 [GSM y MIB= 10 ng/L]	41,0	31,0	26,0
	PRUEBA 3 [GSM y MIB= 50 ng/L]	34,0	67,0	41,0
	PRUEBA 4 [GSM y MIB= 150 ng/L]	43,0	43,0	49,0

Fuente: Autor

Figura 9. Comportamiento del color en el agua después de aplicado el CA

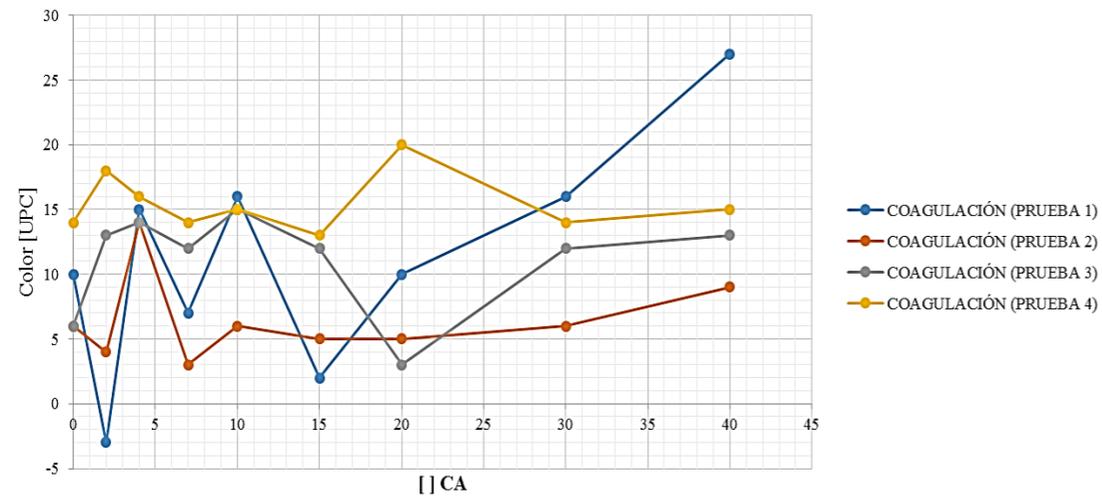
PRETRAMIENTO

Color VS [] CA Pretratamiento



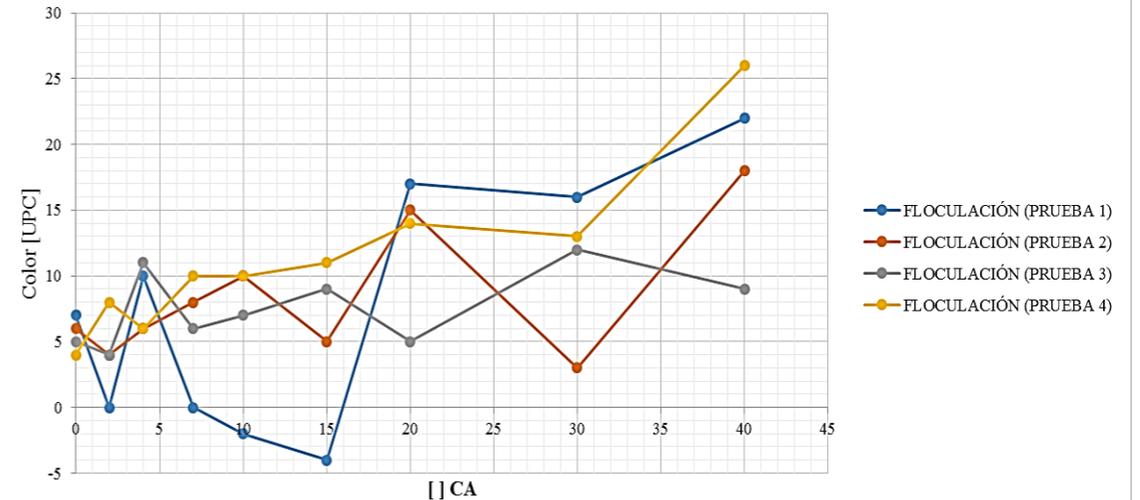
COAGULACIÓN

Color VS [] CA Coagulación



FLOCULACIÓN

Color VS [] CA Floculación



Fuente: Autor

6. CONCLUSIONES

- ✓ Los resultados de Análisis de Componentes Principales demostraron que en general, las mejores dosis de carbón activado en polvo para lograr la remoción de sabor terro-mohoso del agua corresponden a valores altos de 20, 30 y 40 mg/L. Así mismo, estudios realizados en la UIS en el laboratorio de cromatografía – CENIVAM por medio del estudio de cromatografía sobre la misma calidad de agua, comprobaron que dosis bajas de CA no son eficientes en la remoción de GSM y MIB, con base a la masa removida obtenida la cual fue de solo 29 ng, es decir 25,9 %.
- ✓ Los parámetros fisicoquímicos medidos en las pruebas, pH, conductividad, y turbiedad no mostraron cambios significativos en relación con los parámetros iniciales de las muestras. Después del tratamiento de potabilización y aplicación de carbón activado, los resultados en cuanto al pretratamiento, coagulación y floculación se mantuvieron de forma lineal. No obstante, el color logró disminuir de rangos de 26 - 57 UPC a 5 - 25 UPC, siendo el de pretratamiento el de mejor resultado en cuanto a remoción de color.
- ✓ El mejor punto de aplicación para adición de carbón activado en polvo-CA es el pretratamiento; dado que, los resultados de los parámetros fisicoquímicos más bajos se presentaron en este, y en el Análisis de Componentes Principales de intensidades de sabores, el agua no presentó sabor al aplicar CA al inicio del pretratamiento.
- ✓ La calidad del agua determinada en este estudio por medio de los parámetros fisicoquímicos, se encontró aceptable y en los rangos permitidos por el índice de riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano; excepto en ciertas turbiedades las cuales fueron mayores a los permitidos por éstos, también se evidencio que el color tiende a aumentar a mayores dosis de CA lo que puede afectar la tratabilidad del agua.

7. RECOMENDACIONES

Una vez concluida la tesis, se debe considerar los datos arrojados en este proyecto y continuar con un análisis de la importancia del carbón activado para la remoción de sabor y su punto de aplicación, para esto se propone:

- ✓ Extender los estudios de remoción de GSM y MIB en el pre tratamiento a escala laboratorio, aumentando el tiempo de contacto del carbón activado en el pre sedimentación.
- ✓ Desarrollar filtros con mayor eficiencia de remoción de turbiedad del agua tratada, para evitar su colmatación con el CA, coagulante, y veces utilizado.
- ✓ Realizar varias corridas experimentales con las dosis y punto de aplicación de carbón activado encontrado más eficiente en el presente estudio, para así constatar la remoción de GSM y MIB en el agua.
- ✓ Estudiar diferentes concentraciones de coagulante para determinar tanto la dosis más óptima para trabajar con el carbón activado, como su acción en la remoción de sabor terro-mohoso en el agua.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Action, O. F. (2010). Fact Sheet. *International Journal*, 5–6.

<https://doi.org/10.4135/9781452276236.n183>

Aguilera, E. C., & Titus, J. T. (2013). PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE CONCÓN-ESVAL.

amb. (2017). Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S. Retrieved from

<http://www.amb.com.co/frmInformacion.aspx?inf=36>

AMB. (2017). MANUAL BOSCO.

Brient, L., Vézic, C., & Bertru, G. (2001). Rapport final Evaluation des efflorescences à cyanobactéries dans des eaux de cours d ' eau et plans d ' eau bretons . Retrieved from <http://parlonstechneau.univ-rennes1.fr/2009/files/evaluation-des-efflorescences.pdf>

Casanova, S. Q. (2012). R-Chemical _ Expertos en Tratamiento de Agua – La Prueba de Jarras en una Planta de Tratamiento de Agua Potable. R- chemical. Retrieved from <http://www.r-chemical.com/la-prueba-de-jarras-en-una-planta-de-tratamiento-de-agua-potable/>

Casero Rodríguez, D. (2008). Potabilización del agua.

Central, instituto tecnico. (2012). Cloración de agua potable. Retrieved from

<file:///C:/Users/Personal/Downloads/Cloración de Agua Potable.pdf>

Cook, D., Newcombe, G., & Sztajn bok, P. (2001). THE APPLICATION OF POWDERED ACTIVATED CARBON FOR MIB AND GEOSMIN REMOVAL : PREDICTING

PAC DOSES IN FOUR RAW WATERS, 35(5), 1325–1333.

David, O. J. F. (2017). 2017 1.

Drikas, M., Dixon, M., & Morran, J. (2009). Removal of MIB and geosmin using granular activated carbon with and without MIEX pre-treatment. *Water Research*, 43(20), 5151–5159. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.08.016>

Filho, F., Seckler, S., Margarida, M., & Rosemeire, A. L. (2013). Interference of iron as a coagulant on MIB removal by powdered activated carbon adsorption for low turbidity waters. *Journal of Environmental Sciences*, 25(8), 1575–1582. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60231-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60231-9)

Garzón, A. (2015). Agua Potable Para Usuarios, (September).

Mancha, U. de C.-L. (2010). Tema 5. Coagulación-Floculación.

Navarro, Natalia. (2015). Prueba de Jarras articulo. Retrieved from <http://www.isa.ec/index.php/va-viene/entry/prueba-de-jarras>

Newcombe, G. (2006). *Chapter 8 : Removal of natural organic material and algal metabolites using activated carbon. Interface Science in Drinking Water Treatment* (Vol. 10). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(06\)80077-3](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(06)80077-3)

Pesquero, I. D. F. (2009). FLORACIONES DE ALGAS NOCIVAS Mareas Rojas y Toxinas Marinas . Dr . Benjamín Suárez Isla Instituto de Ciencias Biomédicas Facultad de Medicina Universidad de Chile Dr . Leonardo Guzmán Méndez, 1–56. Retrieved from http://www.ifop.cl/marearaja/wp-content/uploads/sites/2/2016/01/8_-

FLORACIONES-DE-ALGAS-NOCIVAS-Mareas-Rojas-y-Toxinas-Marinas-
Guzman-y-Suarez-1998.pdf

POSADA, M. I. P. (2000). Recursos Biológicos _ Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Retrieved from

<http://recursosbiologicos.eia.edu.co/ecologia/estudiantes/cianobacterias.htm>

Restrepo Osorno, H. A. (2009). EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN –
FLOCULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.
UNAL.

Reviewed, P. (2017). Effect of NOM and Lime Softening on Geosmin Removal by PAC, 2,
15–26.

Skoog, D. A., & West, D. M. (1986). Introducción a la química analítica.

Srinivasan, R., & Sorial, G. A. (2011). Treatment of taste and odor causing compounds 2-
methyl isoborneol and geosmin in drinking water : A critical review. *Journal of*
Environmental Sciences, 23(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60367-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60367-1)

Tarrant, P., Sawyer, T., Mestek, R., Neuer, S., Booth, S., Consultants, K. J., ... Hill, C. H.
M. (2009). Feasibility Study for Early Warning Systems for Algae-induced Tastes and
Odors Final Report Prepared By.

Tejero, S. J. (2015). TEMA filtracion, 293.

Trojan Technologies España. (2014). Fact sheet, 1–2.

UNAM. (2017). Instituto de Ingeniería. Retrieved from <http://www.iingen.unam.mx/es->

mx/Investigacion/Areas/Paginas/RecursosHidricos.aspx

Yang, J., Yuan, D., & Weng, T. (2010). Pilot study of drinking water treatment with GAC ,
O 3 / BAC and membrane processes in Kinmen Island , Taiwan. *DES*, 263(1–3), 271–
278. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.06.069>

Yolanda, I., & Cárdenas, A. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación.

Zoschke, K., Engel, C., Bo, H., & Worch, E. (2011). Adsorption of geosmin and 2-
methylisoborneol onto powdered activated carbon at non-equilibrium conditions :
Influence of NOM and process modelling. *ELSEVIER*, 5, 0–6.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.006>

9. ANEXOS

9.1. Referencias fotográficas del proceso de test de jarras

Registro 1. Adición de coagulante y carbón activado



Registro 2. Simulación de la pre sedimentación conos Imhoff



Registro 3. Etapa de filtración



Registro 4. Pruebas de catación Catación



9.2. Resultados de catación

Registro 5. Datos de catacion

GENERAL PRUEBA 1

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
P0	3	4	1	0	2	1	2
P2	1	6	1	0	0	1	
P4	2	5	2	1	0	2	
P7	2	5	1	0	1	1	1
P10	1	7	0	0	1		1
P15	1	6	0	2	0	1	
P20	1	6	0	1	0	1	
P30	0	7	0	0	0		
P40	1	6	0	0	0		1

GENERAL PRUEBA 2

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
P0	0	7	0	0	0		
P2	1	6	1	0	0	1	
P4	0	7	0	0	0		
P7	0	7	0	0	0		
P10	3	4	3	0	0	3	
P15	1	6	1	0	0	1	
P20	2	5	0	1	1	2	
P30	2	5	1	1	0	2	
P40	1	6	1	0	0	1	

GENERAL PRUEBA 3

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
P0	4	3	0	1	3	3	1
P2	3	4	2	0	1	2	1
P4	6	1	4	2	0	1	5
P7	5	2	1	4	0	4	1
P10	3	4	0	3	0	3	
P15	3	4	1	1	1	1	2
P20	5	2	5	0	0	4	1
P30	3	4	0	1	2	3	
P40	5	2	2	1	2	2	3

GENERAL PRUEBA 4

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
P0	6	1	3	1	2	5	1
P2	3	4	0	1	2	3	
P4	5	2	4	0	1	5	
P7	6	1	2	2	2	5	1
P10	5	2	3	2	0	4	1
P15	5	2	4	1	0	5	
P20	3	4	2	1	0	2	1
P30	4	3	3	0	0	3	
P40	2	5	2	0	0	2	

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
F0	2	5	1	0	1	2	
F2	3	4	2	0	1	2	1
F4	1	6	0	1	0		1
F7	1	6	0	0	1	1	
F10	4	3	3	1	0	3	1
F15	5	2	1	2	2	3	2
F20	2	5	0	2	0	2	
F30	2	5	1	0	1	1	1
F40	0	7	0	0	0		

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
F0	1	6	0	1	0		1
F2	6	1	2	0	4	6	
F4	2	5	2	0	0	1	1
F7	2	5	0	2	0	1	1
F10	4	3	0	2	2	3	1
F15	2	5	1	1	0	1	1
F20	2	5	1	1	0	1	1
F30	5	2	1	2	2	5	
F40	1	6	0	0	1	1	

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
F0	6	1	5	0	1	6	
F2	5	2	4	0	1	5	
F4	6	1	4	0	2	4	2
F7	4	3	1	2	1	3	1
F10	7	0	2	4	1	7	
F15	7	0	2	2	3	5	2
F20	6	1	2	1	3	4	2
F30	5	2	1	0	4	5	
F40	6	1	1	3	2	4	2

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
F0	6	1	3	2	1	6	
F2	4	3	2	0	2	3	1
F4	4	3	2	1	1	4	
F7	6	1	1	1	4	6	
F10	6	1	1	4	1	5	1
F15	7	0	2	4	1	6	1
F20	5	2	1	3	1	5	
F30	4	3	3	0	1	4	
F40	5	2	3	1	1	5	

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
C0	0	7	0	0	0		
C2	3	4	2	0	1	3	
C4	2	5	1	1	0	2	
C7	2	5	0	0	1	1	1
C10	3	4	2	0	1	2	1
C15	2	5	0	2	0	1	1
C20	1	6	0	1	0	1	
C30	2	5	0	1	1	2	
C40	2	5	1	1	0	2	

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
C0	2	5	1	0	1	1	1
C2	3	4	2	1	0	3	
C4	0	7	0	0	0		
C7	1	6	1	0	0		1
C10	1	6	1	0	0	1	
C15	0	7	0	0	0		
C20	2	5	1	0	1		2
C30	3	4	2	0	1	2	1
C40	0	7	0	0	0		

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
C0	4	3	1	1	2	3	1
C2	2	5	2	0	0	2	
C4	7	0	4	2	1	5	2
C7	3	4	1	2	0	2	1
C10	5	2	2	2	1	4	
C15	5	2	2	2	1	4	1
C20	4	3	2	1	1	3	1
C30	4	3	0	3	1	3	1
C40	5	2	1	1	3	4	1

Muestra	Sabe	No	B	M	A	Tierra	Moho
C0	7	0	5	0	2	7	
C2	5	2	2	1	2	5	
C4	5	2	2	3	0	4	1
C7	6	1	1	5	0	6	
C10	5	2	0	3	2	4	1
C15	3	4	1	2	0	3	
C20	7	0	3	2	2	7	
C30	6	1	4	1	1	6	
C40	3	4	0	0	3	3	

Fuente: Autor

