

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL TIPO DE CARBÓN ACTIVADO UTILIZADO
PARA EL MANEJO DEL MAL SABOR EN EL AGUA DE LA PLANTA BOSCONIA
DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA (AMB).**

JUAN CAMILO OROZCO TRUJILLO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
SEPTIEMBRE 2018**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL TIPO DE CARBÓN ACTIVADO PARA EL
MANEJO DEL MAL SABOR EN EL AGUA DE LA PLANTA BOSCONIA DEL
ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA (AMB).**

JUAN CAMILO OROZCO TRUJILLO

Proyecto de grado como requisito para optar el título de Ingeniería ambiental

DIRECTOR

M.Sc Álvaro Andrés Cajigas Cerón

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
SEPTIEMBRE 2018**

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia por el apoyo y ánimo brindado a lo largo de estos años de aprendizaje.

Al director de tesis, Álvaro Cajigas Cerón, por su paciencia y enseñanza.

A Paola Reyes Zambrano por toda su colaboración y consejos para que fuera posible la realización de este proyecto.

A Naidu Villamizar quien siempre estuvo dispuesta a colaborarme en lo que necesitara.

A Andrea Gómez y Edwing Herrera por brindarme una ayuda cuando más lo necesitaba, para que todo saliera de la mejor manera.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. Objetivo general.....	13
2.2. Objetivos específicos.....	13
3. MARCO TEORICO.....	14
3.1. Antecedentes.....	14
3.2. Aspectos fisicoquímicos del agua.....	16
3.2.1. Turbiedad.....	16
3.2.2. Color.....	16
3.2.3. pH.....	17
3.2.4. Conductividad.....	18
3.2.5. Olor y sabor.....	18
3.3. Fundamentos de la coagulación.....	20
3.4. Fundamentos de la floculación.....	21
3.5. Fundamentos de la sedimentación.....	21
3.6. Fundamentos de la filtración.....	22
3.7. Fundamentos de la cloración.....	24
3.8. Prueba de jarras.....	24
3.9. Generalidades del carbón activado.....	25
3.9.1. Carbón activado en polvo.....	26
3.9.2. Carbón activado granular.....	27
3.10. Técnicas para el análisis del carbón activado.....	27
3.10.1. Microscopio electrónico de barrido.....	27
3.10.2. Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas.....	28
3.10.3. Análisis de componentes principales.....	28
3.11. MARCO CONTEXTUAL.....	29
4. METODOLOGÍA.....	32
4.1. Revisión teórica y comercialmente tipos de carbón activado idóneos para la remoción de los problemas de sabor en el agua.....	32
4.2. Evaluación de las concentraciones y eficiencia de cada tipo de carbón activado en polvo.....	32
4.2.1. Unidad experimental.....	32
4.2.2. Factores de tratamiento.....	33
4.2.3. Variables de respuesta.....	34

4.2.4. Análisis estadístico.....	35
4.3. Evaluación de la eficiencia del carbón activado granular en un lecho fijo para la remoción de geosmina y MIB.	35
4.3.1. Montaje de los filtros.....	35
4.3.2. Puesta en marcha de los filtros.....	36
5. RESULTADOS y ANÁLISIS.....	37
5.1. Evaluación del carbón activado en polvo.	37
5.1.1. Análisis cualitativo del carbón activado en polvo.	37
5.1.2. Análisis cuantitativo del carbón activado en polvo.....	47
5.2. Evaluación del carbón activado granular en un lecho fijo.....	52
6. CONCLUSIONES.....	57
7. RECOMENDACIONES.....	58
8. BIBLIOGRAFIA.....	59
9. ANEXOS.....	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proceso de potabilización a escala laboratorio.....	32
Tabla 2. Combinación factorial de CAP.....	34
Tabla 3. Parámetros y métodos empleados para el análisis del CAP.....	34
Tabla 4. Parámetros y métodos empleados para el análisis de CAG.....	36
Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas de la primera concentración de geosmina y MIB.....	39
Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas de la segunda concentración de geosmina y MIB.....	41
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de la tercera concentración de geosmina y MIB.....	44
Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas de la cuarta concentración de gesomina y MIB.....	46
Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas para 114 ng/L de geosmina y 45 ng/L de MIB analizadas por (GC-MS/SIM).....	47
Tabla 10. Composición química superficial de los carbones activados en polvo.....	49
Tabla 11. Propiedades fisicoquímicas para 24 ng/L de geosmina y 968 ng/L de MIB analizadas por (GC-MS/SIM).....	50
Tabla 12. Resultados de catación para 35 ng/L de geosmina y 1000 ng/L de MIB en un lecho fijo de CAG.....	52
Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas de CAG para la primera concentración de geosmina y MIB	53
Tabla 14. Propiedades fisicoquímicas de CAG para la segunda concentración de geosmina y MIB.....	54
Tabla 15. Resultados de catación para 150 ng/L de geosmina y 150 ng/L de MIB en un lecho fijo de CAG.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura molecular de la geosmina.....	19
Figura 2. Estructura molecular del MIB.....	20
Figura 3. Medios convencionales de filtración.....	22
Figura 4. Puntos de aplicación del CAP en una planta de tratamiento de agua Convencional.....	26
Figura 5. Estructuras de pretratamiento.....	30
Figura 6. Estructuras de tratamiento.....	31
Figura 7. Composición de los filtros convencionales a escala laboratorio.....	33
Figura 8. Filtros de carbón activado granular.....	36

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Tendencias del CAP para 1.5 ng/L de geosmina y 6.5 ng/L de MIB.....	37
Gráfica 2. Tendencias del CAP para 10 ng/L de geosmina y 10 ng/L de MIB.....	40
Gráfica 3. Tendencias del CAP para 50 ng/L de geosmina y 50 ng/L de MIB.....	42
Gráfica 4. Tendencias del CAP para 150 ng/L de geosmina y 150 ng/L de MIB.....	45
Gráfica 5. Porcentaje de remoción del CAP aplicado en la floculación.....	48
Gráfica 6. Porcentaje de remoción del CAP con adición de poliacrilamida.....	50

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Percepciones de los catadores para 1.5 ng/L de geosmina y 6.5 ng/L de MIB.....	63
Anexo 2. Percepciones de los catadores para 10 ng/L de geosmina y 10 ng/L de MIB.....	63
Anexo 3. Percepciones de los catadores para 50 ng/L de geosmina y 50 ng/L de MIB.....	64
Anexo 4. Percepciones de los catadores para 150 ng/L de geosmina y 150 ng/L de MIB.....	64
Anexo 5. Catación detallada de la primera concentración..... de geosmina y MIB para el CAG.	65
Anexo 6. Catación detallada de la segunda concentración..... de geosmina y MIB para el CAG.	65
Anexo 7. Lugar de residencia de los catadores mediante el uso de CAG.....	65
Anexo 8. Composición química superficial de las materias..... primas usadas en el lecho fijo.	66
Anexo 9. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido..... para el CAP de cáscara de coco.	66
Anexo 10. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido..... para el CAP de madera.	67
Anexo 11. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido..... para el CAP bituminoso.	67
Anexo 12. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido..... para el CAG de cáscara de coco.	68
Anexo 13. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido..... para el CAG bituminoso.	68
Anexo 14. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido..... para la antracita.	69

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Evaluación del efecto del tipo de carbón activado utilizado para el manejo del mal sabor en el agua de la Planta Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb)

AUTOR(ES): JUAN CAMILO OROZCO TRUJILLO

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): M.Sc ALVARO ANDRÉS CAJIGAS CERON

RESUMEN

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto del tipo de carbón activado aplicado para la eliminación del mal sabor en la planta de tratamiento de agua potable Bosconia. La evaluación del carbón activado en polvo (CAP) se dividió en dos partes, en la primera parte se adicionaron cuatro concentraciones de geosmina (1,5; 10; 50 y 150 ng/L) y MIB (6,5; 10; 50 y 150 ng/L) y cuatro dosis de CAP (7, 15, 30 y 40 mg/L) aplicados en pretratamiento, a los cuales se le hizo un análisis de componentes principales; la segunda parte consistió en adicionar dos concentraciones de geosmina (114 y 24 ng/L) y MIB (45 y 968 ng/L) y tres dosis (2, 5 y 8 mg/L) aplicados en la floculación, adicionalmente a las segundas concentraciones de cada compuesto se le adicionó poliacrilamida; se les hizo un análisis cuantitativo por medio de cromatografía de gases acoplada espectrometría de masas. La evaluación del carbón activado granular (CAG) en un lecho fijo, se basó en la interpretación de las percepciones obtenidas de catadores. Tanto para el CAP y CAG se analizaron las superficies químicas. Como resultados se obtuvo que la remoción de las dosis de CAP aplicadas en el pretratamiento fue directamente proporcional a la concentración inicial de los dos compuestos en el agua. En cuanto a las dosis aplicadas en la floculación, el desempeño del carbón activado estuvo ligado principalmente al contenido de oxígeno, azufre y nitrógeno; a su vez la adición de la poliacrilamida alteró la eficiencia del CAP bituminoso por su mayor densidad. Las percepciones obtenidas al implementar el carbón activado granular dependió de la composición química superficial, además del lugar de residencia de las personas debido a que la planta de tratamiento Bosconia abastece a gran parte del área metropolitana de Bucaramanga, sesgando los resultados.

PALABRAS CLAVE:

Carbón activado, composición química, geosmina, MIB, catación

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Evaluation of type effect of activated carbon used for the management of bad taste in the water at the Bosconia drinking water plant of Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga

AUTHOR(S): JUAN CAMILO OROZCO TRUJILLO

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: M.Sc ALVARO ANDRÉS CAJIGAS CERON

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the effect of the type of activated carbon applied to the elimination of bad taste in Bosconia drinking water treatment plant. The evaluation of powdered activated carbon (PAC) was divided into two parts, in the first part was added four concentrations of geosmin (1.5, 10, 50 and 150 ng / L) and MIB (6.5, 10, 50 and 150 ng / L) and four doses of PAC (7, 15, 30 and 40 mg / L) with pretreatment application point, a quantitative analysis called principal component analysis was made; the second part consisted of adding two concentrations of geosmin (114 and 24 ng / L) and MIB (45 and 968 ng / L) with doses (2, 5 and 8 mg / L) with flocculation application point, in addition to the second concentrations of each compound, polyacrylamide was added; A quantitative analysis was made by means of gas chromatography coupled mass spectrometry. The evaluation of granular activated carbon (GAC) in a fixed bed was based on the interpretation of the perceptions obtained from tasters. For PAC and GAC, the chemical surfaces were analyzed. As results, it was obtained that removal of the PAC doses applied in the pretreatment was directly proportional to the initial concentration of the two compounds in the water. Regarding the doses applied in flocculation, the performance of activated carbon was mainly linked to oxygen, sulfur and nitrogen content; At the same time, the addition of polyacrylamide altered the efficiency of the bituminous PAC due to its higher density. The perceptions obtained implementing the granular activated carbon depended on the chemical composition; in addition, the residence address of the people was a crucial point because the Bosconia treatment plant supplies a large part of the metropolitan area of Bucaramanga, biasing the results.

KEYWORDS:

Activated carbon, chemical composition, geosmin, MIB, taste

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN.

La potabilización del agua en las principales ciudades del país es una meta llevada a cabo casi en su totalidad (Pereira Bonilla et al. 2017). El reto que presentan actualmente las empresas prestadoras del servicio público de agua es suprimir o en su defecto, mitigar las sustancias causantes de mal sabor y olor en el recurso hídrico a niveles micro y nanogramos que pueden causar rechazo por parte de los consumidores (Rescorla et al. 2017).

Los problemas de mal sabor y olor en el agua se deben a la presencia de metabolitos secundarios de cianobacterias, especialmente geosmina y 2-metilisoborneol (MIB), que pueden ser percibidos a concentraciones tan bajas como 10 ng/L (Zoschke et al. 2011),(Yu et al. 2007). Sin embargo, las plantas de tratamiento de agua potable convencionales son ineficientes en la remoción de estos compuestos.

En determinadas épocas del año se presentan problemas de sabor y olor en la planta de tratamiento de agua potable Bosconia. Según el “Informe de Sustentabilidad” del 2015 del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), desde el 2013 la comunidad ha venido presentando quejas por el mal sabor y olor del agua que les llega a la residencia. (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga 2015)

Una de las tecnologías más eficaces en la remoción de geosmina y MIB es el carbón activado (Srinivasan & Sorial 2011), este puede usarse en polvo o granular, dependiendo si el evento es esporádico o constante respectivamente. La capacidad de remoción del carbón activado depende de su materia prima, ya sea por la cantidad de microporos presentes o por la afinidad con ciertas sustancias. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es evaluar la capacidad de remoción de geosmina y MIB implementando diferentes tipos de carbón activado en polvo y granular disponibles en el mercado.

2. OBJETIVOS.

2.1. Objetivo general.

Evaluar el efecto del tipo de carbón activado aplicado para la eliminación del mal sabor en la planta Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb).

2.2. Objetivos específicos.

- Revisar teórica y comercialmente los tipos de carbón activado idóneos en la remoción de los problemas de sabor en el agua.
- Evaluar las concentraciones y la eficiencia de cada tipo de carbón activado en polvo para la remoción de geosmina y MIB.
- Evaluar la eficiencia del carbón activado granular en un lecho fijo para la remoción de geosmina y MIB.

3. MARCO TEORICO.

3.1. Antecedentes.

El uso del carbón activado ha tenido gran aceptación en todo el mundo, como tratamiento avanzado debido a su capacidad de remoción de un vasto rango de contaminantes orgánicos presentes en el recurso hídrico, que los procesos convencionales en una planta de tratamiento de agua potable no pueden lograr. De este modo se provee al consumidor una calidad de agua que cumple con las regulaciones actuales, así como reduciendo el riesgo que puede resultar de los contaminantes que están sin regular (*Chowdhury et al. 2013*); teniendo en cuenta que la ciencia está continuamente identificando la presencia de sustancias químicas en el suministro de agua potable que pueden afectar la salud pública, aun en pequeñas concentraciones (*EPA 2015*).

El carbón activado en polvo se usa en mayor medida, debido a su relativo bajo costo y a su eficiencia en remoción de sustancias generadoras de mal sabor y olor en el agua (*Zoschke et al. 2011*). Estudios han demostrado que las concentraciones de carbón activado en polvo dependen de las características fisicoquímicas iniciales del agua, así como el tipo de carbón usado.

Un estudio llevado a cabo en Alemania evaluó la remoción de geosmina y MIB a una concentración inicial a 100 ng/L y con una concentración de 2,7 mg/L de materia orgánica natural; con dosis de carbón activado en polvo de 2, 4, 6, 8 y 10 mg/L, obteniendo una remoción de 55, 80, 90, 92, 96 % para geosmina y 20, 30, 50, 60 y 60 % para MIB respectivamente (*Zoschke et al. 2011*). La remoción de MIB se da en menor medida porque es más sensible a la concentración de materia orgánica natural que la geosmina. La geosmina tiene una solubilidad y peso molecular más bajo, que se refleja en una mejor adsorción en los poros del adsorbente usado (NORIT SA SUPER) (*Cook et al. 2001*). Aunque la materia orgánica natural también compite por los espacios de adsorción con la geosmina, se estima que equivale a solo un 2% del total, razón por la cual se presenta una mejor remoción en comparación con el MIB (*Matsui et al. 2013*).

Un estudio realizado en Brasil usó carbón activado en polvo a concentraciones de 10, 20, 30 y 40 mg/L en la mezcla rápida de coagulación, con y sin coagulante. Cuando no se adicionó coagulante se obtuvo una remoción desde 67-72%; al adicionar el

coagulante a concentraciones de 0, 10, 20 y 30 mg/L se obtuvieron remociones del 66, 67, 51 y 56 % respectivamente, para concentraciones iniciales de geosmina y MIB de 200 y 400 ng/L. Al adicionar el coagulante junto con el carbón activado se obtuvo mejor remoción porque parte del adsorbente quedó atrapado dentro del floc en la coagulación (Ferreira et al. 2013).

Otro estudio llevado a cabo en Australia concuerda que el floc generado en la coagulación-floculación puede alterar la capacidad de adsorción del carbón activado en polvo; se evaluaron tres aguas con diferentes turbiedades, en donde aquella que presentó la más alta turbiedad inicial, influyó en la capacidad de adsorción del adsorbente por la coagulación/floculación. Adicionalmente, experimentos mostraron que la turbiedad sola no afecta la remoción de geosmina y MIB del carbón activado para concentraciones de 5, 10, 15 y 20 mg/L (Cook et al. 2001).

La cantidad y tamaño de microporos presentes en el carbón activado influye proporcionalmente en la capacidad de remover geosmina y MIB, así lo indica (Yu et al. 2007) quién evaluó cinco muestras comerciales de carbón activado en polvo; tres de ellas fueron bituminoso, una de madera y el otro de cáscara de coco. Los que presentaron más microporos fueron los derivados de fruta y madera respectivamente. Así mismo la adsorción de geosmina y MIB fue inferior en los de origen mineral (Yu et al. 2007)

El desempeño del carbón activado granular también se ve influenciado por el origen de la materia prima y por la cantidad de microporos presentes, como lo muestra Issam Najm, quien comparó uno de lignito con uno bituminoso, donde ambos presentaron buena remoción de turbiedad y biofiltración (Najm et al. 2005). No obstante, el carbón activado granular de lignito presentó una menor densidad, que se ve reflejado en una menor cantidad de agua requerida para el retro lavado, así mismo, al momento de llenar el lecho fijo, se requerirá una proporción más baja. Otro estudio realizado en Estados Unidos de América, evaluó cuatro tipos de carbón activado granular (bituminoso, lignito, turba y madera) para la remoción de MIB usando isothermas de adsorción; el que mejor resultado obtuvo fue el bituminoso, seguido por la turba, lignito y madera (Chen et al. 1997).

3.2. Aspectos fisicoquímicos del agua.

3.2.1. Turbiedad.

La turbidez, expresada generalmente como unidades nefelométricas de turbidez (UNT), describe la pérdida de claridad del agua causada por partículas en suspensión (por ej., arcilla y sedimentos), precipitados químicos (por ej., manganeso y hierro), partículas orgánicas (por ej., desechos vegetales) y organismos. La turbidez puede ser causada por la mala calidad del agua de la fuente, el tratamiento deficiente y, en los sistemas de distribución, por la alteración de sedimentos y biopelículas o el ingreso de agua sucia a través de roturas de tuberías principales y otras fallas. (OMS 2012)

La turbidez juega un papel importante en la calidad del agua de consumo humano porque una de las primeras impresiones que se perciben es la transparencia. La turbidez también está compuesta por constituyentes orgánicos e inorgánicos y esas partículas orgánicas pueden contener microorganismos. Por tanto, las condiciones de turbidez incrementan la posibilidad de una enfermedad de transmisión hídrica. (Spellman & Drinan 2000)

Debajo de 4 UNT, la turbidez se puede detectar solo con instrumentos, pero con 4 UNT o más, puede verse una suspensión de color blanco lechoso, barroso, rojo-marrón o negra. Los grandes sistemas de agua municipales (los que sirven a más de 10.000 personas) deben producir consistentemente agua sin turbidez visible y deben ser capaces de alcanzar 0,5 UNT antes de la desinfección en todo momento y un promedio de 0,2 UNT o menos. (OMS 2012)

3.2.2. Color.

Idóneamente, el agua de consumo no debe tener ningún color apreciable. Generalmente, el color en el agua de consumo se debe a la presencia de materia orgánica coloreada principalmente ácidos húmicos y fúlvicos asociada al humus del suelo. Asimismo, la presencia de hierro y otros metales, bien como impurezas naturales o como resultado de la corrosión, también tiene una gran influencia en el color del agua. También puede proceder de la contaminación de la fuente de agua con vertidos industriales y puede ser el primer indicio de una situación peligrosa. (OMS 1995)

El color del agua se clasifica como color verdadero o como color aparente. El color del agua que se debe parcialmente a los sólidos disueltos que permanecen después de haber eliminado la materia orgánica en suspensión, se conoce como color verdadero. El color que aporta la materia suspendida en el agua es el color aparente. El color se mide por comparación de la muestra de agua con soluciones estándar de color, o discos de vidrio coloreado. Una unidad de color (UC) es equivalente al color producido por 1 mg/L de solución de platino. Entre 10 y 15 unidades de color es el máximo permitido al no detectarse visiblemente. (Spellman & Drinan 2000)

En general, el termino color se refiere al color verdadero del agua y se acostumbra a medirlo junto con el pH, pues la intensidad del color depende de este último. Normalmente el color aumenta con el incremento del pH. (Romero 2002)

3.2.3. pH.

Es uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua, aunque no suele afectar directamente a los consumidores. Se debe prestar mucha atención al control del pH en todas las fases del tratamiento del agua para garantizar que su clarificación y desinfección sean satisfactorias. Para que la desinfección con cloro sea eficaz, es preferible que el pH sea menor que 8; no obstante, el agua con un pH más bajo será probablemente corrosiva. El pH del agua que entra en el sistema de distribución debe controlarse para reducir al mínimo la corrosión del sistema de fontanería en las instalaciones domésticas. (OMS 1995)

El control de la alcalinidad y del contenido de calcio también contribuye a la estabilidad del agua y a regular su capacidad corrosiva de tuberías y electrodomésticos. Si no se reduce al mínimo, la corrosión puede provocar la contaminación del agua de consumo y efectos adversos en su sabor y aspecto. El pH óptimo necesario variará en distintos sistemas de abastecimiento en función de la composición del agua y la naturaleza de los materiales empleados en el sistema de distribución; suele oscilar entre 6,5 y 8. (OMS 1995)

3.2.4. Conductividad.

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación. Por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad. Por esta razón, el valor de la conductividad se usa mucho en análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos. (Romero 2002)

La experiencia indica que el producto del valor de la conductividad en $\mu\text{mho/cm}$ por un factor que oscila entre 0,55 y 0,7 es igual al contenido de sólidos disueltos, en mg/L ; dicho factor depende de los iones en solución en el agua y de la temperatura; en general es alto, mayor de 0,7 en aguas salinas o de calderas, y bajo, menor de 0,55, en aguas con alcalinidad caustica o acidez mineral. (Romero 2002)

3.2.5. Olor y sabor.

Se mencionan en conjunto por estar íntimamente ligados. Los olores y sabores en el agua están asociados con la presencia de sustancias indeseables causando el rechazo del consumidor. Las posibles causas de los olores y sabores objetables son debido a la presencia del plancton, compuestos orgánicos generados por la actividad de las bacterias y algas, a los desechos industriales o a la descomposición de la materia orgánica. Específicamente la sustancia que produce olores en la descomposición de la materia orgánica es el H_2S . No existen instrumentos para determinar los olores y sabores en el agua; generalmente estos se reportan en los análisis de aguas como presentes o no presentes. (Sierra 2011)

Uno de los problemas más comunes de sabor y olor reportados por las plantas de agua potable es la presencia de olores y sabores mohoso-terrosos causados por 2-metilisoborneol (MIB) y geosmina, siendo el mohoso característico del MIB, que a concentraciones altas puede llegar a tener un olor similar al alcanfor (Watson et al. 2016). Estos compuestos orgánicos son subproductos microbianos que son fácilmente detectados por el sentido del olfato humano. De hecho, muchas personas notarán un olor y sabor terroso o mohoso si las concentraciones de MIB exceden de

7 a 10 ng/L, o si excede concentraciones de geosmina a 4 ng/L. (Chowdhury et al. 2013)

A bajas concentraciones, la influencia de los olores sobre el normal desarrollo de la vida humana tiene más importancia por la tensión psicológica que generan que por el daño que puedan producir al organismo. Concentraciones altas de olores molestos pueden reducir el apetito, producir náuseas y vómitos. También pueden interferir o rebajar el valor de la propiedad, el aspecto estético o paisajístico de una región. (Sierra 2011)

3.2.5.1. Generalidades de geosmina.

Es conocida como trans-1,10-dimetil-trans-9-decalol y fue aislado por primera vez por Gerber. La geosmina es producida por diversas clases de microbios, incluyendo cianobacterias (algas verde-azules) y actino bacterias especialmente a través de *Streptomyces*, los cuales liberan geosmina cuando estos microbios mueren. Durante el verano, floraciones de algas pueden ocurrir mediante condiciones ricas en nutrientes y altas temperaturas (por encima de 20°C), resultando en problemas de sabor y olor, disminuyendo la calidad del agua. Su sabor y olor característico es referenciado como terroso. (Hanbai Park 2013)

Algunas bacterias del suelo también son conocidas por producir geosmina; estas bacterias del suelo pueden ser lavadas por la escorrentía de lluvia en corrientes de agua cercanas donde aumentan aún más la prevalencia de compuestos causantes de olores en las aguas superficiales. (Bamuza-Pemu & Chirwa 2012)

En la figura 1 se muestra la estructura molecular de la geosmina

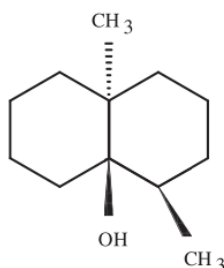


Figura 1. Estructura molecular de la geosmina; peso molecular: 182 g/mol; su forma aplanada le permite alcanzar los sitios de adsorción; aunque hay un grupo hidroxilo presente en la estructura, se considera hidrofóbica.

Fuente: (Ho et al. 2012)

3.2.5.2. Generalidades de 2-Metilisoborneol.

2-Metilisoborneol (MIB) es conocido como 1,6,7,7-tetrametilbicyclo[2.2.1]heptan-6-ol y es un químico orgánico con bajo umbral de olor y sabor. Este compuesto tiene un sabor mohoso característico. MIB también fue descubierto por Gerber. MIB es tan complejo como la geosmina para ser removido por las tecnologías convencionales de tratamiento de agua debido a su bajo umbral de olor, cuyo valor es aproximadamente de 4 a 10 ng/L. MIB a menudo es acompañado por geosmina cuando las cianobacterias y actinobacterias abundan en el agua. (Hanbai Park 2013)

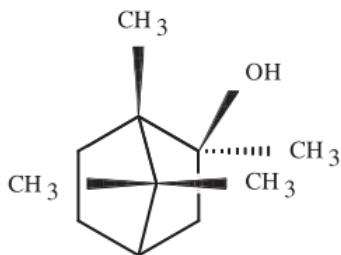


Figura 2. Estructura molecular del MIB; peso molecular: 169 g/mol; Aunque hay un grupo hidroxilo presente en la estructura, se considera hidrofóbica.

Fuente: (Ho et al. 2012)

3.3. Fundamentos de la coagulación.

El objeto de la coagulación es convertir las partículas pequeñas en flóculos más grandes y así hacerlos precipitar o dejarlos en suspensión. Los flóculos están condicionados así a una eliminación rápida posterior. Para este propósito se añaden al agua bruta coagulantes químicos, habitualmente basados en aluminio (sulfato de aluminio) y en hierro (sulfato férrico), en condiciones controladas para formar un hidróxido metálico flocúleno sólido. Las dosis de coagulante habituales son de 2 a 5 mg/l para las sales de aluminio y de 4 a 10 mg/l para las de hierro.

El flóculo precipitado retira los contaminantes suspendidos y disueltos en el agua mediante mecanismos de neutralización de carga, adsorción y atrapamiento. La eficiencia del proceso de coagulación es función de la calidad del agua bruta, del coagulante o aditivos de coagulación utilizados y de factores operativos, como las condiciones de mezclado, la dosis de coagulación y el pH. El flóculo se retira del agua tratada mediante procesos posteriores de separación de sólidos y líquidos como la sedimentación o flotación, la filtración rápida por gravedad o a presión, o una combinación de métodos. (OMS 1995)

3.4. Fundamentos de la floculación.

Las partículas desestabilizadas y los precipitados químicos son el resultado de la coagulación y esta se lleva a cabo para mejorar la calidad de la sedimentación y con ello mejorar su eliminación del agua. Sin embargo, incluso después de la coagulación, las partículas y los precipitados químicos pueden sedimentarse muy lentamente. Para acelerar este proceso se emplea la floculación.

La floculación es el proceso que afecta de manera más importante la eficiencia de la eliminación de partículas. Consiste en un proceso lento en el que las partículas entran en contacto unas con otras para unirse, permanecer juntas y aglomerarse hasta un tamaño capaz de sedimentarse con rapidez. Se debe proporcionar un mezclador suficiente para que se formen los flóculos y se mantengan hasta sedimentarse en los depósitos de la floculación. Cuando más fuerte sea el floculo y más alta la concentración de sólidos en la solución, más tiempo de mezcla se requiere para mantener el floculo en suspensión. Para que los flóculos se desarrollen, se debe producir una rotación lenta, de una revolución por minuto. La velocidad de aglomeración o floculación depende del número de partículas presentes, del volumen relativo que ocupan y del gradiente de velocidad creado (Spellman & Drinan 2000).

3.5. Fundamentos de la sedimentación.

La sedimentación es la eliminación de las partículas en suspensión, los flóculos químicos, los precipitados y otros sólidos sedimentables, por efecto de la gravedad. La sedimentación, en el proceso convencional de tratamiento de agua potable, tiene lugar entre la floculación y la filtración.

En el tratamiento de agua, la mayoría de los tanques de sedimentación son clarificadores de flujo ascendente donde el agua sube verticalmente hacia el punto de descarga la cual se verifica por medio de canales. Mas específicamente, en un tanque de sedimentación ideal, el agua fluye horizontalmente, llenando la balsa ascendentemente y fluye hasta rebosar y salir por un canal de descarga. Los flóculos se sedimentan en sentido opuesto al del flujo, y se sacan mediante un mecanismo continuo de extracción de lodo. Las partículas cuya velocidad de asentamiento son

mayores que las del líquido rebosante, se asientan y se sacan con el lodo. Los flóculos ligeros se van con el efluente. (Spellman & Drinan 2000)

3.6. Fundamentos de la filtración.

Filtración es el proceso donde el agua se trata fluyendo a través de una cama de material granular, dando como resultado la remoción de los contaminantes.

Los primeros filtros usados para el tratamiento de agua fueron los filtros lentos, los cuales utilizan una capa de arena fina de 1 m soportada sobre un lecho de grava de aproximadamente 0,30 m. Estos filtros fueron reemplazados por los filtros rápidos, filtros de arena generalmente con lavado ascensional, con tasas de filtración mucho mayores y, por consiguiente, con requerimientos de área mucho menores. Posteriormente, con el uso de medios filtrantes duales o lechos mezclados, se lograron diseños mucho más económicos en área, al usar tasas de filtración todavía mayores que las de los filtros rápidos convencionales. (Romero 1999)

La figura 3 muestra los tres tipos de medios filtrantes comúnmente usados en tratamientos de agua. Donde el numero 1 hace referencia a arena media, el numero 2 a grava, el numero 3 a antracita, el numero 4 a arena fina y el numero 5 a granate.

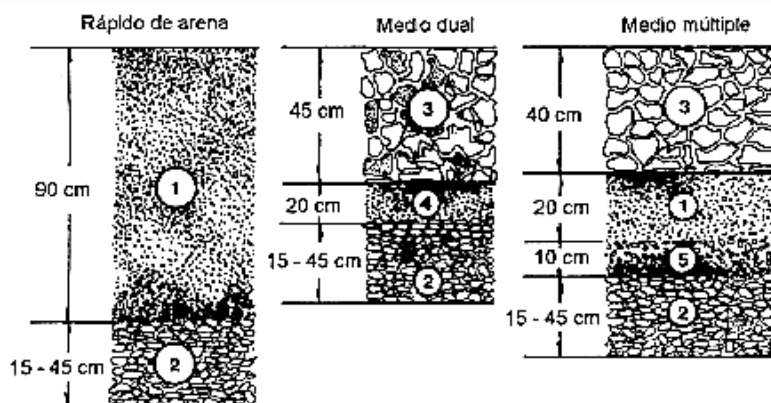


Figura 3. Medios convencionales de filtración.

Fuente: (Romero 1999)

La remoción de los contaminantes es causada por varios procesos, como la filtración mecánica, la sedimentación, la adsorción, la oxidación química y biológica, las actividades bacteriológicas y similares.

La filtración mecánica elimina las partículas suspendidas que son más grandes al tamaño de los poros del lecho filtrante. Como tal, este proceso de tratamiento se limita a la capa superior del lecho en los filtros descendentes, siendo independiente del caudal y no puede eliminar sólidos en suspensión o bacterias.

La eliminación de sólidos en suspensión o bacterias es posible con la sedimentación, que funciona de la misma manera que el proceso descrito para las cuencas de sedimentación. Las principales diferencias son que, en el caso de filtración, el área de superficie sobre la que se puede asentar el material suspendido es significativamente menor. Después de todo, esta superficie es el área superficial total de los lados superiores de los granos, en una cantidad que no está cubierta por otros granos no expuestos a la erosión. Dependiendo del grosor de la capa o del tamaño del grano, esta área de superficie varía entre 100 y 1000 (m²) por metro cuadrado de lecho filtrante.

Las partículas suspendidas no se mueven a la superficie del grano solo debido a la gravedad, sino también a causa de la fuerza hidrodinámica y la inercia o de la difusión laminar y turbulenta. Cuando la partícula suspendida se acerca a la superficie granular, se adherirá a ella debido a las fuerzas de London-van der Waals y de Coulomb.

La atracción de masa actúa en cualquier momento y en cualquier partícula, pero la atracción eléctrica solo es posible cuando los gránulos y las partículas en suspensión tienen carga opuesta. La arena está cargada negativamente de forma natural, por lo que puede adsorber todos los iones cargados positivamente como el hierro, manganeso y similares. En algunos lugares en el lecho del filtro, se pueden adsorber suficientes partículas cargadas positivamente para que la carga cambie, haciendo que los gránulos ahora sean capaces de atraer todos los iones cargados negativamente como partículas coloidales, materia orgánica, bacterias y similares. Esta situación puede repetirse algunas veces; la carga total, sin embargo, siempre disminuye, reduciendo la capacidad de purificación del filtro a un nivel que ya no limpia suficientemente el agua. Luego, el filtro debe lavarse a contracorriente para recuperar la capacidad de purificación. (de Moel et al. 2006)

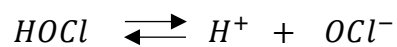
3.7. Fundamentos de la cloración.

La desinfección tiene una importancia incuestionable en la seguridad del abastecimiento de agua de consumo humano. La eliminación de microorganismos patógenos es una operación fundamental que muy frecuentemente se realiza con productos químicos reactivos como el cloro. (OMS 2012)

El cloro es el desinfectante más comúnmente utilizado en el mundo, debido a que tiene una alta característica de toxicidad para los microorganismos causantes de enfermedades hídricas. Este desinfectante reacciona en el agua, formando ácido hipocloroso



El ácido hipocloroso se descompone en iones de hipoclorito



La pared celular de los microorganismos patógenos está cargada negativamente; de esta manera el ácido hipocloroso puede penetrar al ser neutro, en lugar del ion hipoclorito cargado negativamente. (de Moel et al. 2006)

La desinfección residual se utiliza como protección parcial contra la contaminación con concentraciones bajas de microorganismos y su proliferación en el sistema de distribución. El uso de productos químicos desinfectantes en el tratamiento del agua suele generar subproductos. No obstante, los riesgos para la salud que ocasionan estos subproductos son extremadamente pequeños en comparación con los riesgos asociados a una desinfección insuficiente. (OMS 2012)

3.8. Prueba de jarras.

El mejor enfoque para determinar la capacidad de tratamiento de una fuente de agua y determinar los parámetros óptimos (coagulante más efectivo, tasas de dosis requeridas, pH, tiempos de floculación, coadyuvantes floculantes más efectivos) es mediante el uso de una prueba de jarras.

Como el pH óptimo y la dosis de coagulante varían significativamente con las características del agua cruda, una investigación exhaustiva inicial de las variaciones en la calidad del agua cruda de la fuente debería ayudar a seleccionar el tipo

apropiado de sistema de coagulación que se utilizará y su diseño. Las variaciones inesperadas en la calidad del agua sin tratar pueden hacer que el proceso de coagulación se vea comprometido, lo que ocasiona problemas con la calidad del agua tratada.

El procedimiento normal al realizar una prueba con jarra es, inicialmente, encontrar el coagulante y la tasa de dosis más eficaces, y luego determinar el pH óptimo para el coagulante elegido y la tasa de dosis. El rendimiento generalmente se juzga por la turbidez y luego por la remoción del color (o absorbancia UV). Las pruebas de jarras también se pueden usar para comparar la utilidad de diferentes polielectrolitos floculantes, pero no sus tasas de dosis óptimas; esto debe hacerse en la propia planta. (Ministry of Health 2015)

3.9. Generalidades del carbón activado.

Los carbones activados se fabrican a partir de una amplia gama de materiales carbonosos. Los materiales precursores más comunes para su uso en el tratamiento de agua potable son carbón bituminoso, carbón de lignito, cáscaras de coco y madera. La elección de la materia prima afecta la estructura interna del poro, la distribución del área superficial y la química de la superficie. La producción comercial de carbón activado es un proceso de dos pasos de carbonización de los materiales precursores y la activación. En el proceso de carbonización pirolítica, la temperatura de la materia prima se eleva al rango de 500 a 800 °C en ausencia de oxígeno. La materia orgánica volátil de la materia prima se libera térmicamente, y los átomos de carbono se realinean para formar una estructura más cristalina.

El producto carbonizado en este punto del proceso está muy influenciado por las materias primas utilizadas. Para carbones activados utilizados en el tratamiento del agua, una activación térmica precede el proceso anterior, en el que se aumenta la temperatura del producto carbonizado en el rango de 850 a 1,000 °C en presencia de un agente oxidante, típicamente vapor o dióxido de carbono. La activación aumenta los tamaños de poro y crea una estructura de poro continuo, lo que aumenta el volumen de microporos (ancho de poro <2 nm) y el área superficial interna. Los volúmenes de mesoporo y macroporo (ancho de poro > 2 nm) son fundamental para

el transporte interno del compuesto a la superficie de microporos, que es donde ocurre la mayor parte de la adsorción. (Chowdhury et al. 2013)

El carbón activado es la sustancia más efectiva para eliminar los compuestos de sabor y olor de naturaleza orgánica. Puede usarse en carbón activado en polvo (CAP) o en forma de carbón activado granular (CAG). El CAG se usa normalmente cuando se requiere la eliminación de sabor y olor continuamente por largos períodos; para la ocurrencia estacional que dura varios días o para tratar incidentes de contaminación resulta más económico el CAP. (Ratnayaka et al. 2009a)

3.9.1. Carbón activado en polvo.

El carbón activado en polvo (CAP) puede ser un tratamiento efectivo y económico bajo las condiciones apropiadas. CAP se contacta con el agua contaminada como una lechada, adsorbe los contaminantes, y se elimina con las partículas en el proceso de gestión de sólidos. El CAP no se recupera y reactiva, por lo tanto, la tasa de uso de carbono (lb/día) puede ser alta. Sin embargo, el bajo costo de capital asociado con el sistema de alimentación, combinado con la capacidad de aplicarlo estacionalmente o por problemas periódicos, pueden hacer que sea una alternativa económica basada en un costo anualizado.

El punto de aplicación del CAP debe ser trascendental para la efectividad del carbón. Esta localización debe procurar que el adsorbente tenga una mezcla efectiva con el agua, el mayor tiempo de contacto y la menor interacción posible con otras sustancias químicas usadas en el tratamiento del agua. La figura 4 muestra los puntos de aplicación más comunes como son el pretratamiento, mezcla rápida, floculación y después de la sedimentación.

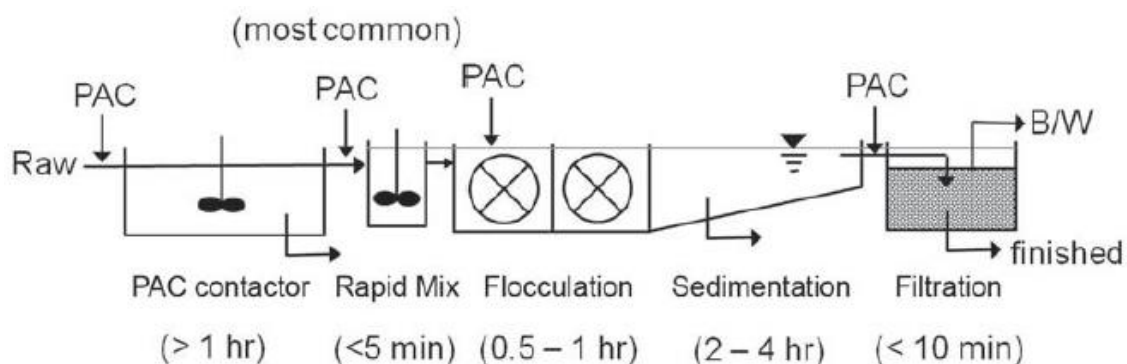


Figura 4. Puntos de aplicación del CAP en una planta de tratamiento de agua convencional.
Fuente: (Chowdhury et al., 2013)

3.9.2. Carbón activado granular.

Adsorbentes o filtros de carbón activado granular (CAG) empleados para la remoción de materia orgánica, son similar a los filtros de arena del tipo de gravedad o presión rápida, excepto que los adsorbentes de tipo de gravedad son generalmente encerrado en un empaque o totalmente cubierto. CAG es un buen medio filtrante y por lo tanto podría ser utilizado por sí solo para la filtración de la turbidez, pero, para dicha filtración, CAG estaría sometido a un lavado frecuente y podría ser degradado, al ser más friable que la arena. En consecuencia, las pérdidas como finos serían mucho mayores que cuando se usan solo para la adsorción. (Ratnayaka et al. 2009b)

El uso de carbón activado granular (CAG) puede ser un tratamiento eficaz para contaminantes de interés, que se encuentran regularmente en las fuentes de aguas a concentraciones altas. Generalmente, el CAG se contacta con el agua contaminada en un lecho fijo. El proceso no es un proceso de estado estacionario, debido al desgaste del adsorbente, haciendo que la concentración de efluentes aumenta con el tiempo. Una vez que se alcanza la concentración del efluente objetivo, la operación del adsorbente se detiene y el CAG se retira del contactor, siendo reemplazado con uno nuevo o reactivado; esta reactivación se puede hacer ya sea en el sitio o fuera del sitio. Debido a que el CAG en un reactor de lecho fijo está en equilibrio con la concentración de contaminantes del afluente, puede eliminar más del contaminante por masa de carbón activado aplicado en comparación con CAP en un reactor de mezcla completa de flujo continuo. (Chowdhury et al. 2013)

3.10. Técnicas para el análisis del carbón activado.

3.10.1. Microscopio electrónico de barrido.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es uno de los instrumentos más versátiles disponibles para el examen y análisis de la morfología de la microestructura y caracterización de la composición química (Zhou et al. 2007). Las imágenes de un microscopio electrónico se obtienen mediante la detección, procesamiento y visualización de las señales resultantes de las interacciones entre un haz de electrones de alta energía con la materia. Una de estas señales emitidas son los rayos X, y su análisis provee información química de la sustancia examinada.

La identificación de los elementos presentes en una muestra es llevada a cabo por el Microanálisis Dispersivo en Energía (EDS Energy Dispersive Spectroscopy). El cual se encarga de detectar los rayos X emitidos por la muestra, produciendo pulsos de altura proporcional a la energía de cada fotón incidente. Los pulsos electrónicos son procesados para finalmente ser visualizados en un espectro que gráfica la cantidad de pulsos en función de la energía característica de cada pulso. (Ipohorski & Bozzano 2013).

3.10.2. Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas.

La cromatografía de gases es una técnica separativa que tiene la cualidad de conseguir la separación de mezclas muy complejas. Por otra parte, la espectrometría de masas puede identificar de manera casi inequívoca cualquier sustancia pura, pero normalmente no es capaz de identificar los componentes individuales de una mezcla sin separar previamente sus componentes, debido a la extrema complejidad del espectro obtenido por superposición de los espectros particulares de cada componente.

Por lo tanto, la asociación de las dos técnicas da lugar a una técnica combinada GC-MS que permite la separación e identificación de mezclas complejas. En caso de poder comparar con los correspondientes patrones, se puede llevar a cabo, además, el análisis cuantitativo de los compuestos identificados. (Gutiérrez & Droguet 2002)

3.10.3. Análisis de componentes principales.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística proveniente del análisis exploratorio de datos cuyo objetivo es la síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables), perdiendo la menor cantidad de información posible. (Rodríguez 2008)

El objetivo del ACP es recomponer las variables originales en los nuevos ejes que mostrará la estructura del primer espacio de atributos e interpretar las componentes, esto es, dar carta de identidad a la estructura emergida. (Colina 1991)

Para interpretar la nube de puntos-individuos en un plano principal, conviene tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Un punto-individuo situado en el extremo de uno de los ejes, significa que ese individuo está muy relacionado con el respectivo componente.
- Cuando existen puntos-individuos cercanos al origen, significa que estos individuos tienen poca o ninguna relación con los dos componentes.
- Las proximidades entre individuos se interpretan como similitud de comportamiento de éstos con respecto a las variables. Por ejemplo, dos puntos-individuos que están muy cercanos en el plano, significa que ambos individuos tienen valores próximos en cada una de las respectivas variables. *(González et al. 1980)*

3.11. MARCO CONTEXTUAL.

La planta de tratamiento de agua potable Bosconia hace parte del proyecto Suratá, cuyos estudios fueron realizados en el año de 1980, y el cual se hizo con el objeto de ampliar el suministro al Área Metropolitana de Bucaramanga, con un horizonte de diseño al año 2000. El proyecto comprendió la construcción de: la captación del río Suratá, las obras de pretratamiento: tanques desarenadores y presedimentadores, la planta de tratamiento de Bosconia, estación de bombeo de agua tratada, subestación eléctrica, línea de impulsión y el sistema de redes y tanques para la distribución del agua a la ciudad.

El proyecto río Suratá inició operaciones en agosto de 1984 aumentando en 2000 l/s la capacidad de producción mínima confiable del sistema completando una capacidad total de producción de 3840 l/s, que servirán para atender la población del Área Metropolitana del año 2003.

La planta 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. La planta tiene una capacidad de 2000 l/s, y es del tipo convencional con tanques desarenadores, presedimentadores, mezcla rápida, floculación mecánica, sedimentación y filtración. *(Almeyda 2002)*

Las etapas de coagulación, filtración y desinfección en la planta de tratamiento de agua potable Bosconia presentan las siguientes características:

- La mezcla rápida es de tipo hidráulica con un resalto y una canaleta Parshall en la zona de coagulación.
- La planta cuenta con 12 filtros de tipo descendiente que operan generalmente en su totalidad en las horas de funcionamiento de la planta.
- El medio filtrante es de un metro de profundidad y está constituido en un 100 por ciento por antracita, aunque originalmente era un lecho múltiple (arena y antracita). La arena se perdió en su totalidad debido a que la renovación que se hace del medio solo es de antracita y las arenas tienden a tener mayores pérdidas en el retro lavado por su tamaño.
- La desinfección se realiza mediante la adición de cloro líquido posterior a la filtración y previa al bombeo, e incluso se añade cloro en el pretratamiento. (Blanco & Wilson 2017)

En la figura 5 se muestran las estructuras de pretratamiento.

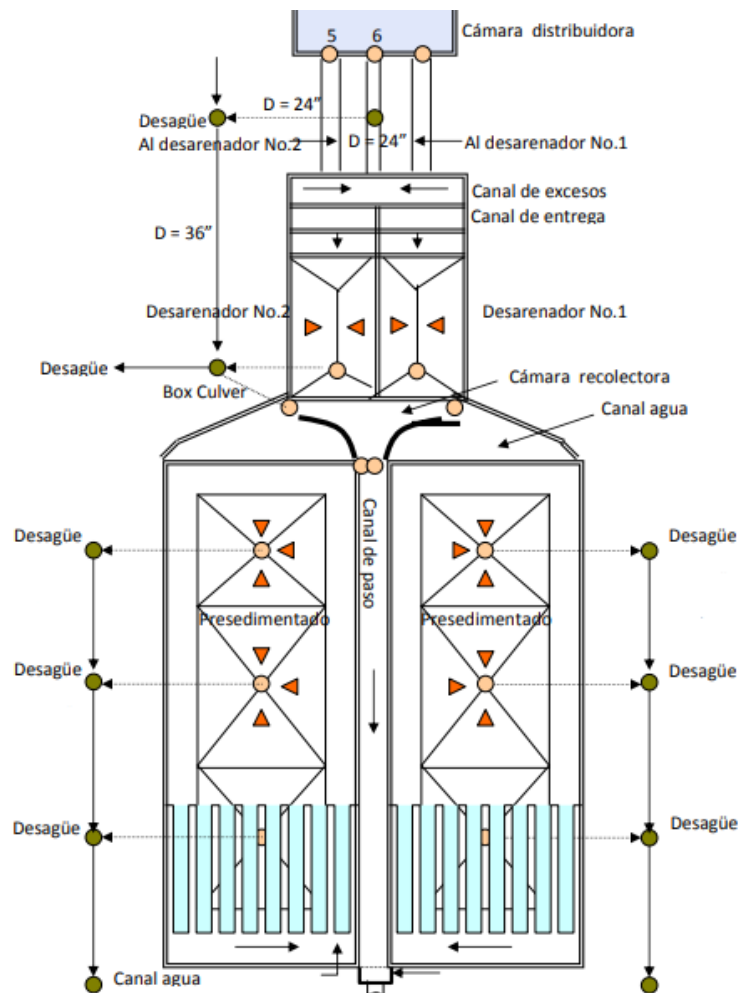


Figura 5. Estructuras de pretratamiento.
Fuente: (Acuña 2008).

En la figura 6 se muestra el bosquejo de las estructuras de tratamiento



Figura 6. Estructuras de tratamiento.

Fuente: (Acuña 2008).

4. METODOLOGÍA.

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, el estudio constó de tres fases:

4.1. Revisión teórica y comercialmente tipos de carbón activado idóneos para la remoción de los problemas de sabor en el agua.

En bibliografía se encontró que los materiales más comunes para el uso en tratamientos de agua potable son carbón bituminoso, lignito, cáscara de coco y madera (Bansal et al. 1988), (Worch 2016). Se buscó comercialmente los tipos de carbones previamente mencionados en las principales ciudades del país, siendo Medellín (Área Metropolitana del Valle de Aburrá) la que mayor oferta presentó. Carbones activados en polvo de origen vegetal se encontraron de cáscara de coco y de madera; y de origen mineral sólo bituminoso. carbones activados granulares se adquirieron de cáscara de coco y bituminoso. Además, se buscó en el Área Metropolitana de Bucaramanga encontrando carbón granular de cascara de nuez, que, aunque no fue referenciado bibliográficamente se probó su desempeño.

4.2. Evaluación de las concentraciones y eficiencia de cada tipo de carbón activado en polvo.

4.2.1. Unidad experimental.

Las pruebas fueron llevadas a cabo por medio de la prueba de jarras utilizando un volumen útil de 1 litro. El equipo de jarras (floculadores) se adaptó para que los tiempos y gradientes del proceso de la coagulación y floculación simularan los empleados en la PTAP Bosconia. La tabla 4 muestra el proceso de potabilización llevado a escala laboratorio.

Tabla 1. Proceso de potabilización a escala laboratorio

Proceso	Tiempo (min)	Simulación en el laboratorio				
Adición del CAP	1	Mezcla rápida	300 RPM			
Pre-sedimentación	29	Cono Imhoff	0 RPM			
Coagulación	1	Mezcla rápida	300 RPM			
Floculación	6 c/u	Mezcla lenta	50	37	38	25
Sedimentación	33	Jarra	0 RPM			
Filtración	5	Filtro	0 RPM			
Desinfección	30	Frasco oscuro	0 RPM			

Fuente: Autor. CAP: Carbón Activado en Polvo.

El carbón se diluyó con agua destilada en un vaso precipitado para luego ser mezclado en un agitador magnético, procurando obtener la mejor uniformidad posible. Tanto el CAP como el coagulante fueron añadidos por medio de jeringas plásticas a las jarras.

Se armaron filtros con recipientes plásticos de 250 ml sin fondo, cuya composición fue gravilla, arena blanca (se escogió esta arena por la facilidad en el lavado con respecto a la arena convencional) y antracita (orden ascendente), debido a que esa es la composición convencional de los filtros en las plantas de tratamiento (Romero 1999). En la parte inferior de cada filtro se ubicó una capa de gasa de 5 mm, con el fin de sostener la gravilla. Cada componente del filtro fue lavado individualmente hasta que la diferencia de turbiedad entre el agua tratada y la emitida por estos fuera lo más pequeña posible (1,0 UNT de diferencia; el agua potable del grifo tuvo un promedio 0,5 UNT). En la figura 7 se puede observar la formación de los filtros.



Figura 7. Composición de los filtros convencionales a escala laboratorio
Fuente: Autor

4.2.2. Factores de tratamiento.

Para los factores de tratamiento se implementó un diseño factorial con tres factores, correspondientes a los tipos de carbón activado en polvo conseguidos. Cada uno de estos factores tenía cuatro niveles, siendo las dosis encontradas en la bibliografía para los adsorbentes, los cuales abarcan la remoción de geosmina y MIB a distintas concentraciones que se pueden encontrar en condiciones naturales; estas concentraciones fueron: 1.5, 10, 50, 150 para geosmina y 6.5, 10, 50 y 150 para MIB (la primera concentración varió entre los dos compuestos al ser el umbral de sabor obtenido en el laboratorio).

Las dosis seleccionadas para los carbones activados fueron 7, 15, 30 y 40 mg/L. En la tabla 2 se muestra la combinación factorial.

Tabla 2. Combinación factorial de CAP.

CAP	Concentraciones (mg/L)			
	7	15	30	40
B	B7	B15	B30	B40
C	C7	C15	C30	C40
M	M7	M15	M30	M40

CAP: Carbón activado en polvo. B: Bituminoso; C: Cáscara de coco; M: Madera.

Fuente: Autor.

Los blancos fueron muestras sin adicionar alguna concentración de carbón activado, es decir, solo el tratamiento convencional llevado a cabo.

4.2.3. Variables de respuesta.

Las variables de respuesta de este proyecto fueron: turbiedad, color, pH, conductividad, concentración e intensidad del sabor de geosmina y MIB. Los métodos empleados para la medición de estos parámetros se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros y métodos empleados para el análisis del CAP.

Parámetro	Método empleado
Turbiedad	Medición con Multiparámetro
pH	
Conductividad	
Color	Espectrofotómetro
Concentración de geosmina y MIB	Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas*
Intensidad de geosmina y MIB	Catación*
Composición química superficial de CAP	Análisis EDS (Microscopio Electrónico de Barrido)

* pruebas distintas

Fuente: Autor.

Los métodos empleados para las variables de respuesta se dividieron en dos grupos: al primer grupo se le analizó su eficiencia de remoción por medio de la catación, es decir, personas ajenas al proyecto degustaron el agua tratada y se les preguntó si percibieron sabor alguno, y su intensidad en caso positivo; este grupo consistió en las dosis de carbón activado de la Tabla 2, aplicados junto con las cuatro concentraciones de geosmina y MIB previamente mencionados. El punto de aplicación del CAP para el primer grupo fue en el pretratamiento por su mayor tiempo de contacto.

Para el segundo grupo se analizó las dosis y el punto de aplicación del CAP que

actualmente se lleva a cabo en la PTAP Bosconia (2, 5 y 8 mg/L ; floculación) por medio de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, operada en el monitoreo de iones seleccionados (geosmina y MIB); a su vez, este grupo se dividió en dos, con y sin ayudante de floculación (poliacrilamida), donde las concentraciones evaluadas de geosmina fueron 114 y 24 ng/L, y para el MIB 45 y 968 ng/L respectivamente.

Para el análisis EDS se tomó dos muestras por cada tipo de carbón activado, con la finalidad de captar cuan uniforme es la superficie química de estos adsorbentes.

4.2.4. Análisis estadístico.

Con los resultados obtenidos se usó el análisis de componentes principales para clasificar las respuestas cualitativas de los catadores en tendencias.

4.3. Evaluación de la eficiencia del carbón activado granular en un lecho fijo para la remoción de geosmina y MIB.

4.3.1. Montaje de los filtros.

Los materiales usados para el montaje de los filtros fueron: 50 cm de manguera transparente con un diámetro de 1^{1/4} de pulgada, un tapón con un diámetro de 1^{1/2} de pulgada al cual se le hizo un agujero central para permitir el flujo del agua. Para el ensamblaje de los filtros se tuvo como referencia a (Elhadi et al. 2006) quien comparó el desempeño de la antracita con respecto al carbón activado granular, usando gravilla, arena blanca seguido del adsorbente.

En la figura 8 se muestran los filtros de carbón activado granular usados para evaluar la eficiencia de remoción de geosmina y MIB en un lecho fijo



Figura 8. Filtros de carbón activado granular. Orden de izquierda a derecha: Blanco (antracita), Bituminoso, Nuez, Cáscara de coco.

Fuente: Autor.

4.3.2. Puesta en marcha de los filtros.

Se realizó la prueba de jarras simulando los tiempos de la PTAP Bosconia (ver Tabla 1), con la variante de incluir lechos de carbón activado en la fase de filtración. Se determinaron: turbiedad, color, pH, conductividad, intensidad de geosmina y MIB, y composición química superficial de los carbones por los métodos expuestos en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros y métodos empleados para el análisis de CAG.

Parámetro	Método empleado
Turbiedad	Medición con Multiparámetro
pH	
Conductividad	
Color	Espectrofotómetro
Intensidad de geosmina y MIB	Catación
Composición química superficial de CAP	Análisis EDS (Microscopio Electrónico de Barrido)

Fuente: Autor.

Se analizaron dos concentraciones de geosmina y MIB; 35 y 150 ng/L para el primer compuesto, y 1000 y 150 ng/L para el último. Se escogió una dosis tan alta de MIB porque es el que presenta menor adsorción de los dos, y sirve de base para suponer la remoción de geosmina.

5. RESULTADOS y ANÁLISIS

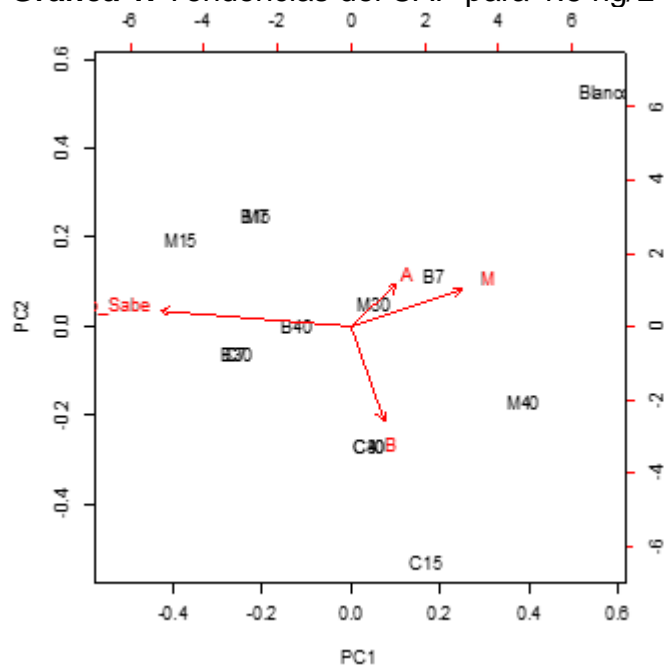
5.1. Evaluación del carbón activado en polvo.

La eficiencia de remoción de un carbón activado depende de varios factores, tales como: las propiedades fisicoquímicas del agua, la composición química superficial y la cantidad de microporos presentes (Cook et al. 2001). Con base en lo anterior, es de entenderse que la mayoría de los estudios se enfocan en estos parámetros, dejando de lado las percepciones de las personas. En este proyecto se hicieron cataciones del agua tratada para posteriormente ser analizados estadísticamente las observaciones dadas por las personas de forma cualitativa.

5.1.1. Análisis cualitativo del carbón activado en polvo.

Este análisis se basa en clasificar las respuestas en tendencias, donde el vector de mayor longitud es el de mayor relevancia. Se analizó la eficiencia del CAP con base a las percepciones expresadas de los catadores para cuatro concentraciones (1.5; 10; 50; 150 ng/L para geosmina y 6.5; 10; 50; 150 ng/L para MIB) de los generadores de mal sabor en el agua. El desempeño de los carbones activados en la remoción de los principales causantes de sabor y olor en el agua, para la concentración más baja propuesta, se puede observar en la gráfica 1. Esta gráfica muestra las tendencias obtenidas de la percepción de los catadores (ver Anexo 1).

Gráfica 1. Tendencias del CAP para 1.5 ng/L de geosmina y 6.5 ng/L de MIB.



No Sabe: no hubo percepción alguna de sabor terroso y/o mohoso; B: Intensidad baja; M: Intensidad media; A: Intensidad alta; Blanco: sin carbón activado.

Fuente: Autor.

El análisis de componentes principales indicó que 1.5 y 6.5 ng/L de geosmina y MIB respectivamente tendió a que los catadores no percibieran sabor alguno, esto se basa en el vector de mayor longitud fue el de “No Sabe”, seguido a este, los resultados se inclinaron a una percepción baja; es de esperarse esta tendencia al estar en el umbral de sabor de estas sustancias. Los carbones activados de origen vegetal (madera y cáscara de coco) presentaron los mejores resultados con la menor dosis propuesta, por parte de los catadores, coincidiendo con (Yu et al. 2007), donde los carbones de origen vegetal presentaron una mejor remoción con respecto a los minerales

A la máxima concentración usada se esperaba que la remoción fuera completa, no obstante, los resultados fueron inferiores en comparación con la dosis mínima en los carbones de origen vegetal y así mismo con las dosis de 15 y 30 mg/L, contrario a lo reportado por (Zoschke et al. 2011). Se puede observar que el punto llamado “Blanco” que simula el tratamiento convencional tuvo una tendencia a ser ineficiente en la remoción de geosmina y MIB (Wang et al. 2018),(Ho et al. 2012),(Srinivasan & Sorial 2011) dando percepciones altas y medias. Estas percepciones “altas” y “medias” son relativas, puesto que las concentraciones usadas son muy bajas.

En este caso no sería factible usar dosis altas al no remover la geosmina y MIB como por el gasto innecesario de material; viéndose reflejado en pérdidas económicas para el acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb).

Es importante tener en cuenta el efecto generado del carbón activado en las propiedades fisicoquímicas del agua; estos parámetros son los primeros en ser afectados en la aceptación o rechazo del líquido por parte de los consumidores. En la tabla 5 se observa las propiedades fisicoquímicas antes y después de aplicar el carbón activado.

Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas de la primera concentración de geosmina y MIB.

CAP (mg/L)	pH	conductividad	turbiedad	color
Agua cruda	7,88	165,8	31,8	76
C (7)	6,94	149,1	0,61	3
C (15)	7,4	154,2	0,66	1
C (30)	7,53	160,4	0,55	3
C (40)	7,61	142,9	1,03	2
M (7)	7,37	161,9	0,85	2
M (15)	7,42	161,3	0,78	2
M (30)	7,37	122,9	2,24	3
M (40)	7,42	161,3	0,8	2
B (7)	7,48	121,5	2,39	2
B (15)	7,43	157,1	0,74	0
B (30)	7,61	132,38	1,74	3
B (40)	7,53	158,4	1,08	3
Blanco	7,53	136,8	0,7	10

CAP: Carbón activado en polvo. C: Cáscara de coco; B: Bituminoso; M: Madera.

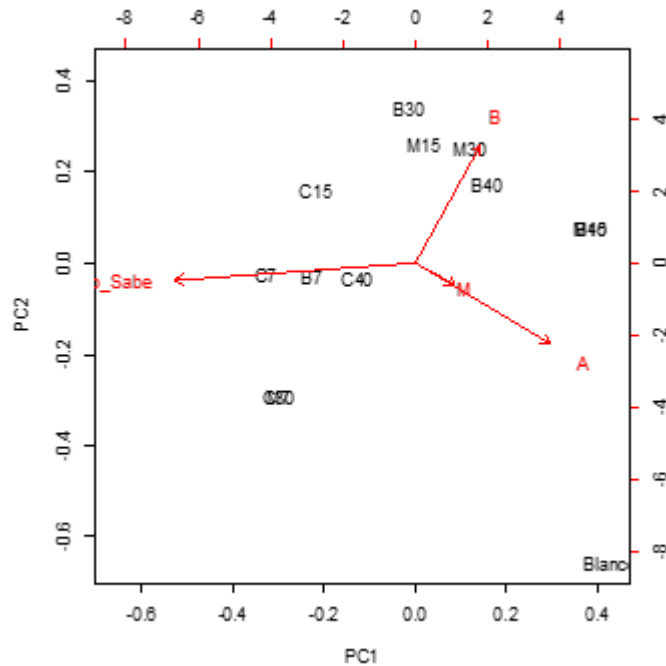
Fuente: Autor

Las muestras cumplen con la normatividad colombiana (Resolución 2115) cuyos valores máximos permisibles para los parámetros de pH, conductividad, turbiedad y color son: 6.5 – 9; 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 2 UNT y 15 UPC respectivamente (*Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial 2007*). Las únicas muestras que no cumplen con la normatividad son las dosis de 30 mg/L CAP de madera, y 7 mg/L de CAP bituminoso al estar levemente por encima de la normatividad en el parámetro de turbiedad; no obstante, para la mayoría de las dosis de CAP de madera y CAP bituminoso, estuvieron por encima del blanco. En este caso, si se aplicara carbón activado en polvo en la PTAP Bosconia, el único recomendado sería el CAP de cáscara de coco, al no alterar los parámetros fisicoquímicos por encima de los límites permitidos. El mayor distanciamiento entre el blanco y el agua tratada con los carbones activados se observó en la remoción del color, de ahí que este sea uno de los principales usos dados a este adsorbente (*Satyawali & Balakrishnan 2007*); sin embargo, con los resultados de este estudio, su uso para este fin, sería innecesario, debido a que el blanco cumple con la normatividad colombiana.

La segunda concentración de geosmina y MIB fue de 10 ng/L por ser el umbral de sabor y olor referenciado en distintos estudios (*Hanbai Park 2013*), (*Yu et al. 2007*),

(Ho & Newcombe 2005), (Zoschke et al. 2011). En la gráfica 2 se observa las tendencias obtenidas de la percepción de los catadores (ver Anexo 2).

Gráfica 2. Tendencias del CAP para 10 ng/L de geosmina y 10 ng/L de MIB.



No Sabe: no hubo percepción alguna de sabor terroso y/o mohoso; B: Intensidad baja; M: Intensidad media; A: Intensidad alta; Blanco: sin carbón activado.

Fuente: Autor.

En las menores dosis de carbón activado se presentó una similitud con la prueba anterior, donde los carbones de procedencia vegetal mostraron una tendencia a tener un mejor desempeño, siendo el de coco más eficiente al tener solo una percepción por parte de los catadores con intensidad baja, mientras que el carbón activado maderoso presentó dos percepciones altas por parte de los catadores; de ahí radica la posición del punto C7 sobre el vector “No sabe”. El punto M7 se encuentra más abajo al estar influenciado por el resultado cuya percepción fue alta (coordenadas -0.3, -0.3; *está en la misma posición del C30, por eso no se distingue claramente*). No obstante, el carbón activado bituminoso mejoró respecto a la primera prueba, presentando dos percepciones, una baja y otra media; se puede evidenciar este resultado por la posición sobre el vector “No sabe”.

Se reafirmó lo observado en la concentración de 1.5 ng/L para geosmina y 6.5 ng/L para MIB; al presentarse concentraciones cercanas al umbral de sabor, no es

recomendable usar dosis altas de carbón activado, pues se estaría incurriendo en un desperdicio de material por su ineficiencia en suprimir la geosmina y MIB.

Las propiedades fisicoquímicas del agua para 10 ng/L de geosmina y 10 ng/L de MIB se pueden observar en la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades fisicoquímicas de la segunda concentración de geosmina y MIB.

CAP (mg/L)	pH	conductividad	turbiedad	color
Agua cruda	8,04	200,9	37,9	55
C (7)	7,82	145	0,81	3
C (15)	7,82	132,7	0,72	2
C (30)	7,88	145,8	0,55	3
C (40)	7,82	146,8	0,74	3
M (7)	7,85	149,9	0,74	1
M (15)	7,83	134,7	0,78	1
M (30)	7,89	143,6	0,62	2
M (40)	7,67	190,5	0,81	0
B (7)	7,87	125,1	0,91	3
B (15)	7,85	135,5	0,83	1
B (30)	7,81	136,8	0,7	1
B (40)	7,83	130	0,95	1
Blanco	7,86	156	1,84	11

CAP: Carbón activado en polvo. C: Cáscara de coco; B: Bituminoso; M: Madera.

Fuente: Autor

En los parámetros fisicoquímicos todas las muestras de esta concentración cumplen con la normatividad, además de mostrar mejores valores que el blanco. El CAP de cáscara de coco con una dosis 30 mg/L obtuvo una turbiedad cercana (0,55 UNT) a la sugerida por la normatividad internacional de tener 0,5 UNT en promedio, siendo 2 UNT el máximo valor permisible (OMS 2012). Esto se debe a las características físicas del carbón activado; aunque se use principalmente para la remoción de sabores en el agua, también es eficaz en retener la turbiedad y las sustancias causantes del color, pues como se evidencia en un estudio, no se presentó diferencias significativas al usar el carbón activado solo y junto al coagulante en la remoción de turbiedad (Ferreira et al. 2013). Sin embargo, el carbón activado en polvo no se usa a menudo para esta función en las plantas de tratamiento por temas económicos, y un aumento en la frecuencia de lavado de los filtros.

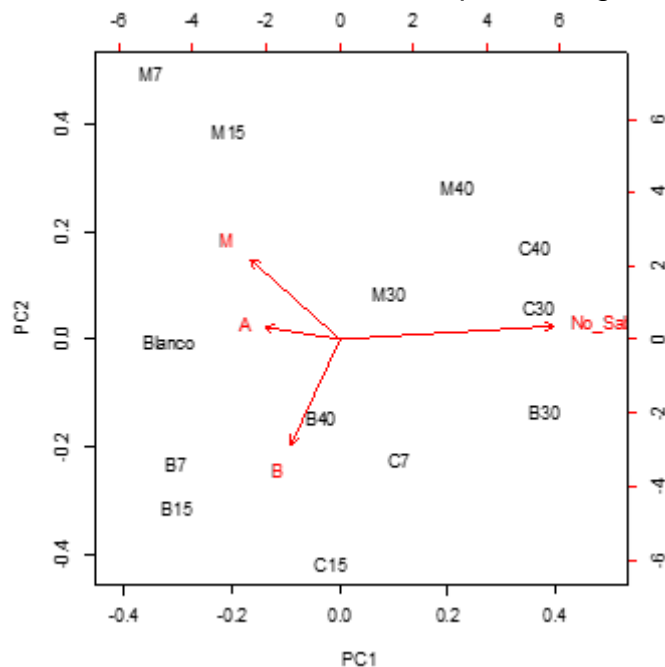
La dosis de carbón activado madera de 40 mg/L influyó negativamente en la conductividad, a pesar de estar por debajo de los límites permisibles (1000 μ S/cm), se distanció del resto de muestras incluyendo al blanco, añadiendo más sólidos

disueltos al agua que en el tratamiento convencional. Una posible explicación a esto es la interferencia del coagulante con el adsorbente, pues al haber mayor cantidad de carbón activado, la tendencia a quedar atrapado en el floc aumenta. De esta forma la remoción de sólidos disueltos en el agua es mayor que en el blanco.

Se pudo observar que a concentraciones bajas de geosmina y MIB, las dosis altas de carbón activado no presentan un factor diferencial en la remoción de turbiedad y/o color con respecto a las dosis más bajas (7 y 15 mg/L).

La tercera concentración seleccionada para geosmina y MIB fue de 50 ng/L, pues se puede presentar en condiciones naturales en cuerpos de agua. Según (Kim et al. 2014) esta concentración es media, siendo ideal para probar el desempeño de los carbones, antes de probar concentraciones altas. En la gráfica 3, se observa las tendencias obtenidas de las percepciones de los catadores (ver Anexo 3) a concentraciones de 50 ng/L tanto para geosmina como MIB.

Gráfica 3. Tendencias del CAP para 50 ng/L de geosmina y 50 ng/L de MIB.



No Sabe: no hubo percepción alguna de sabor terroso y/o mohoso; B: Intensidad baja; M: Intensidad media; A: Intensidad alta; Blanco: sin carbón activado.

Fuente: Autor.

A concentraciones de 50 ng/L para geosmina y MIB la tendencia de percepciones de los catadores cambió un poco respecto a las dos pruebas anteriores, coincidiendo con (Yu et al. 2016),(Cook et al. 2001) quienes afirman que hay una relación proporcional entre la dosis de carbón activado con la remoción de los compuestos

generadores de sabor; las mejores remociones se alcanzaron en la dosis de 30 mg/L para carbón activado de cáscara de coco y bituminoso, siendo este último más eficiente pues solo se obtuvieron dos percepciones en concentraciones bajas; cómo se puede ver en la gráfica 3, B30 está levemente más cerca a la punta (horizontalmente) del vector “No sabe” por su relación con las percepciones bajas. Mientras que C30 tuvo una percepción en concentración baja y otra en alta, por eso su cercanía vertical al vector “No sabe”, al estar influenciado por vector A, que tiene una dirección oeste-nor-oeste.

A concentraciones altas de geosmina y MIB, se necesitan dosis de carbón activado mayores, puesto que en el agua hay más sustancias que compiten por los puestos de adsorción del carbón activado (microporos) como es el caso de la materia orgánica natural; a no ser que se escoja un carbón bimodal, es decir, que tenga gran cantidad de mesoporos y microporos, permitiendo que la geosmina y MIB se adhieran a los microporos antes de que la materia orgánica los obstruya al ubicarse en los mesoporos principalmente (*Chen et al. 2013*). No obstante, también puede competir por los mismos espacios de adsorción de la geosmina y MIB, pero se estima que es solo el 2%, debido al bajo peso molecular (<230 Da), similar a la geosmina (182 Da) y MIB (168 Da) (*Matsui et al. 2013*).

Se confirma que el tratamiento convencional no es óptimo para la remoción de geosmina y MIB al estar siempre en la dirección del vector con la percepción más alta

En la tabla 7 se observa el efecto del carbón activado sobre las propiedades fisicoquímicas para la concentración de 50 ng/L en los dos compuestos generadores de mal sabor.

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de la tercera concentración de geosmina y MIB.

CAP (mg/L)	pH	conductividad	turbiedad	color
Agua cruda	8,04	200,9	37,9	55
C (7)	7,79	140,6	0,42	0
C (15)	7,75	143,8	0,46	1
C (30)	7,73	143,7	0,44	1
C (40)	7,78	157,9	0,62	1
M (7)	7,72	139,6	0,65	4
M (15)	7,69	159,3	0,43	2
M (30)	7,73	141,4	0,59	4
M (40)	7,75	143	0,57	4
B (7)	7,7	151,8	0,48	3
B (15)	7,76	135,9	0,34	3
B (30)	7,75	141,8	0,51	2
B (40)	7,71	154,5	0,37	2
Blanco	7,86	156	1,84	11

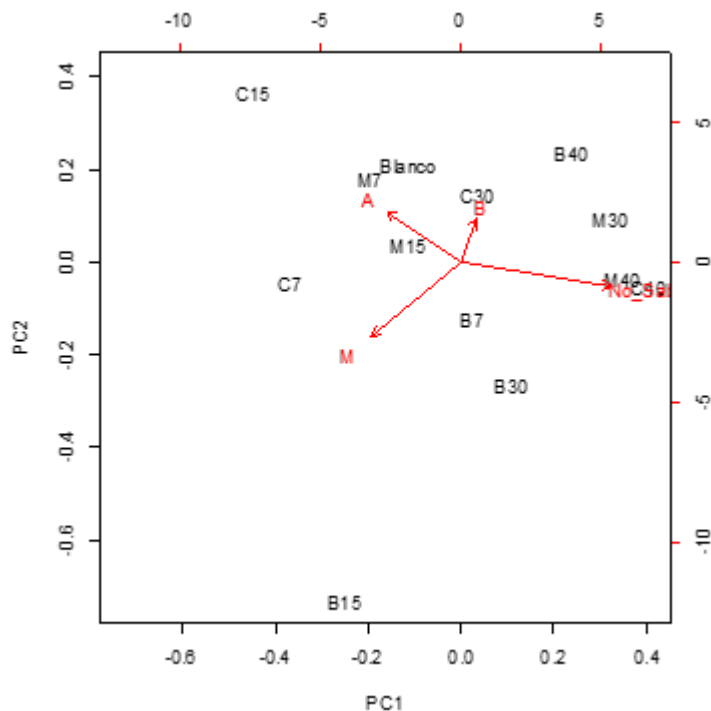
CAP: Carbón activado en polvo. C: Cáscara de coco; B: Bituminoso; M: Madera.

Fuente: Autor

Las muestras de agua con carbón activado tendieron a mantenerse estables, disminuyendo ligeramente los valores de pH con respecto al blanco. Se confirmó la función del carbón activado como removedor de sustancias suspendidas causantes de la turbiedad, alcanzando la media sugerida por la Organización Mundial de la Salud, quien dice que se debe alcanzar 0,5 UNT antes de la desinfección en todo momento (OMS 2012).

La última concentración de los principales causantes de mal sabor en el agua, se escogieron teniendo en cuenta varios estudios (Yu et al. 2016), (Rescorla et al. 2017), (Ferreira et al. 2013), donde mencionan que en condiciones naturales las concentraciones de geosmina y MIB se pueden encontrar entre un rango de 100 – 200 ng/L. En la gráfica 4 se observa las tendencias obtenidas de las percepciones (ver Anexo 4) para una concentración de 150 ng/L para ambos compuestos.

Gráfica 4. Tendencias del CAP para 150 ng/L de geosmina y 150 ng/L de MIB.



No Sabe: no hubo percepción alguna de sabor terroso y/o mohoso; B: Intensidad baja; M: Intensidad media; A: Intensidad alta; Blanco: sin carbón activado.

Fuente: Autor.

Para la última concentración de geosmina y MIB (150 ng/L) se evidenció un patrón directamente proporcional entre la cantidad de sustancias causantes de mal sabor en el agua y las dosis de carbón activado. Además, se ratificó el mejor desempeño de los carbones de origen vegetal sobre el mineral; dosis de 40 mg/L de carbón activado de cáscara de coco y carbón activado de madera presentaron menos percepciones, siendo el de fruta más eficiente al tener la única percepción en intensidad baja; entretanto el carbón activado de madera tuvo su percepción en intensidad alta, por este motivo su posición está hacia el nor-oeste (dirección del vector A), con respecto al punto C40, de la gráfica 4.

El blanco presentó un mejor comportamiento respecto a las dosis más bajas, posiblemente porque en el proceso de coagulación-floculación, ciertas dosis de carbón activado quedaron atrapados en el floc; en tanto, la simulación del tratamiento convencional al no adicionar el adsorbente, el coagulante no tuvo obstáculo para su correcto desempeño.

Un factor muy importante que no se tuvo en cuenta al hacer las pruebas de carbón activado en polvo fue preguntar la ubicación de las residencias de los catadores, debido a la trascendencia que esta tiene en la percepción de sabor de los compuestos

generadores de mal sabor en el agua. La PTAP Bosconia surte a varios tanques de almacenamiento en la zona norte, centro y parte del occidente de la zona metropolitana, así como el tanque de Morrórico, por tal motivo algunas personas podrían estarse acostumbrando a estos sabores, sesgando los resultados. (Secretaría de Planeación 2018), (Almeyda 2002).

En la tabla 8 se presentan los parámetros fisicoquímicos de 150 ng/L tanto para geosmina como MIB, puesta a disposición de los catadores para el análisis del CAP.

Tabla 8. Propiedades fisicoquímicas de la cuarta concentración geosmina y MIB.

CAP (mg/L)	pH	conductividad	turbiedad	color
Agua cruda	8,05	142,1	26,6	54
C (7)	7,79	145,1	0,68	2
C (15)	7,82	147,6	0,4	3
C (30)	7,79	145,5	0,61	3
C (40)	7,89	136,4	0,98	3
M (7)	7,92	143,5	0,85	1
M (15)	7,89	122,3	0,72	2
M (30)	7,9	120,3	0,67	2
M (40)	7,81	121,6	0,49	1
B (7)	7,93	152,8	0,4	1
B (15)	7,95	145,1	0,56	3
B (30)	7,83	118,1	0,64	2
B (40)	7,81	125	0,61	2
Blanco	8,05	135,2	0,8	6

CAP: Carbón activado en polvo. C: Cáscara de coco; B: Bituminoso; M: Madera.

Fuente: Autor

Los resultados de la tabla 8 de fueron similares a los de la tabla 7 donde todos los parámetros cumplen la norma. Se ratificó las leves variaciones en pH, donde el carbón activado bajó unas décimas de este valor, pues el blanco y el agua cruda mantuvieron la misma cifra. En la turbiedad solo las muestras de agua con carbón activado de cáscara de coco a 40 mg/L (0,98 UNT) y carbón activado de madera a 7 mg/L (0,85 UNT) superaron la cifra obtenida por el blanco (0,8 UNT).

Por otro lado, la conductividad indica alteraciones por los carbones activados, sin presentar una relación definida. Al momento de aplicar el carbón activado en polvo en la planta de tratamiento, podría presentar valores de conductividad elevados, por la cantidad de adsorbente que se usaría.

5.1.2. Análisis cuantitativo del carbón activado en polvo.

Para determinar la remoción de geosmina y MIB se aplicó cromatografía de gases acoplada espectrometría de masas operada en el modo de monitoreo de iones seleccionados. Se analizó la eficiencia de los tipos de carbón activado en polvo, según su concentración remanente de geosmina y MIB expuestas en las tablas 9 y 10, junto con las propiedades fisicoquímicas de las muestras de agua tratada con este adsorbente.

En la tabla 9 se observan las propiedades fisicoquímicas de las muestras analizadas sin ayudante de coagulación.

Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas para 114 ng/L de geosmina y 45 ng/L de MIB analizadas por (GC-MS/SIM).

Sin ayudante de coagulación						
Muestras	pH	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Conductividad (µs/cm)	GSM (ng/l)	2-MIB (ng/l)
Concentración inicial en el agua cruda del río	8,1	48,9	92	113,8	114	45
Carbón activado de Coco - floculación - 2 mg/l	8,03	0,82	2	126,8	92	38
Carbón activado de Coco - floculación - 5 mg/l	7,90	0,28	1	127	90	40
Carbón activado de Coco - floculación - 8 mg/l	7,98	1,76	3	122,8	89	39
Carbón activado de Bituminoso - floculación - 2 mg/l	8,1	0,46	2	123,8	91	38
Carbón activado de Bituminoso - floculación - 5 mg/l	8,0	0,51	0	124,8	100	44
Carbón activado de Bituminoso - floculación - 8 mg/l	7,9	0,5	2	125,1	82	33
Carbón activado de Madera - floculación - 2 mg/l	7,9	0,47	2	128,4	96	45
Carbón activado de Madera - floculación - 5 mg/l	7,9	1,52	1	130,6	104	45
Carbón activado de Madera - floculación - 8 mg/l	7,9	0,64	3	127,8	100	45

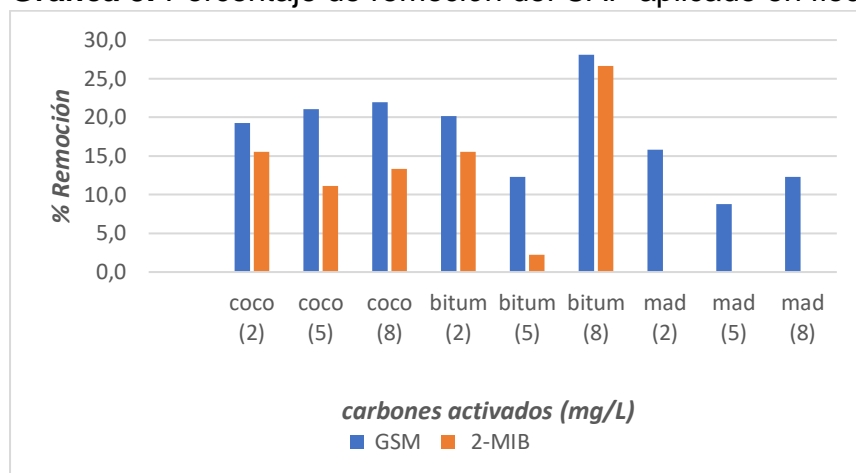
Coagulante usado: Sulfato de aluminio

Fuente: Autor.

Se ratificó el desempeño del carbón activado en la remoción de sólidos suspendidos y disueltos causantes de la turbiedad y color respectivamente, cumpliendo con la normatividad establecida. El pH del agua tiende a bajar levemente, de 8.1 UNT del agua cruda a el rango de 7.9 a 8.03 que abarca los tres tipos de carbón activado en polvo aplicados, pero se mantiene en el rango óptimo (6,5 – 8,5). Aunque la conductividad también se encuentra dentro de los límites establecidos se evidencia nuevamente el incremento de sólidos suspendidos en el agua. Lo cual podría aumentar si se llegase a aplicar a escala real

En la gráfica 5 se evidencia el porcentaje de remoción alcanzado para cada compuesto según la dosis de carbón activado.

Gráfica 5. Porcentaje de remoción del CAP aplicado en floculación.



Fuente: Autor.

El carbón de origen mineral presentó la mejor remoción para geosmina y MIB de una concentración de 8 mg/L, no obstante, a concentraciones más bajas es impredecible el comportamiento del carbón activado bituminoso en la remoción de estos compuestos. Contrario a lo observado con el carbón activado de cáscara de coco, el cual, presentó los resultados más parejos al variar las dosis (2, 5 y 8 mg/L), donde el porcentaje de remoción de geosmina aumentó mientras se incrementaban las dosis, situación que no se presentó con el MIB. En cuanto al desempeño del carbón de origen vegetal, fue el más bajo en las respectivas dosis tanto para la remoción de geosmina, como para la de MIB, siendo incapaz de remover este último compuesto.

Analizando la composición química superficial de los carbones obtenidos por el análisis EDS (ver Tabla 10). El carbón bituminoso presentó una mejor remoción, gracias a que presenta azufre en su composición química superficial, concordando con los estudios de (Matsui et al. 2015), quien observó que los factores influyentes en la adsorción de la geosmina fueron el contenido de nitrógeno y azufre después del oxígeno, al ser el determinante de la hidrofobicidad de un carbón. El carbón de coco presentó el menor porcentaje de oxígeno, siendo así de carácter más hidrófobo, efecto que ayuda a tener una mejor adsorción de la geosmina al ser considerada más hidrofóbica que el MIB, de ahí que a mayor dosis de carbón activado aplicado se pueda remover más de este compuesto, al tener más área donde adherirse. El desempeño del carbón maderoso en la remoción de geosmina se pudo deber a su inconsistencia en la distribución química superficial; el nitrógeno está distribuido parcialmente en el área superficial del carbón, a pesar de ser uno de los elementos

más influyentes en la adsorción. A esto se le suma el porcentaje de oxígeno promedio más alto de los adsorbentes evaluados, aumentando la presencia de sitios polares en el adsorbente, por lo que una interacción agua-adsorbente vía dipolo-dipolo puede ser observada; haciendo que en la solución haya una competencia entre el solvente y soluto por las moléculas de la superficie del adsorbente (*Pendleton et al. 1997*). De este modo el carbón activado maderoso tendría menor capacidad para adherir la geosmina y MIB

Los demás elementos que se pueden observar en la tabla 10, como por ejemplo: el potasio, calcio y silice en el caso de carbón activado de cáscara de coco; el silice y hierro en el carbón activado maderoso; el calcio y azufre en el carbón activado bituminoso, provienen ya sea de la materia prima o introducidos durante el proceso de activación o postratamiento (*Jeguirim et al. 2018*), donde se usa múltiples agentes deshidratantes como el ácido sulfúrico, hidróxido de potasio, carbonato de potasio, entre otros (*Danish et al. 2018*).

Sin embargo, ninguna de las tres dosis pudo remover los causantes de mal sabor a una concentración igual o inferior a 10 ng/L, confirmando así lo obtenido en las cataciones donde a medida que se aumentaba la concentración de geosmina y MIB, dosis bajas de carbones activadas resultaron ineficientes.

A continuación, en la tabla 10 se puede ver el resumen de la composición química superficial de los carbones activados en polvo; en Anexos se encuentran los análisis EDS realizados por el microscopio electrónico de barrido.

Tabla 10. Composición química superficial de los carbones activados en polvo.

Muestra	ELEMENTOS [% masa]							
	Carbono	Oxígeno	Potasio	Calcio	Silice	Nitrogeno	Hierro	Azufre
PAC coco	85,6	11,9	0,87	0,59	1,04	-	-	-
PAC coco	87,46	11,36	0,55	0,2	0,43	-	-	-
PAC madera	78,61	13,61	-	-	0,61	6,74	0,44	-
PAC madera	85,07	13,8	-	-	0,72	-	0,41	-
PAC bitum	85,01	12,97	-	0,99	-	-	-	1,03
PAC bitum	84,63	13,9	-	0,68	-	-	-	0,79

Fuente: Autor.

En la tabla 11 se observan las propiedades fisicoquímicas de las muestras analizadas con ayudante de coagulación (mirar inciso 4.2.3)

Tabla 11. Propiedades fisicoquímicas para 24 ng/L de geosmina y 968 ng/L de MIB analizadas por (GC-MS/SIM)

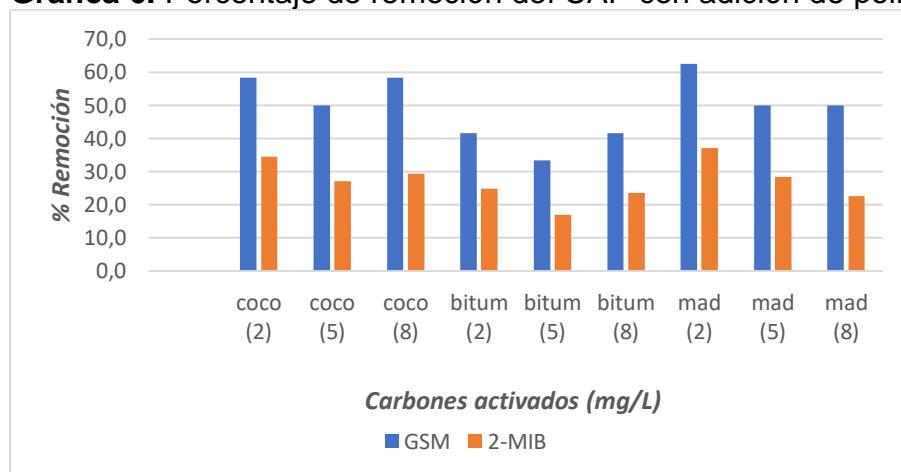
Con ayudante de coagulación						
Muestras	pH	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Conductividad (µs/cm)	GSM (ng/l)	2-MIB (ng/l)
Concentración inicial en el agua cruda del río	8,0	63,8	104	112,6	24	968
Carbón activado de Coco - floculación - 2 mg/l	8,3	0,95	2	127,7	10	634
Carbón activado de Coco - floculación - 5 mg/l	8,3	0,84	2	131,9	12	706
Carbón activado de Coco - floculación - 8 mg/l	7,9	1,19	1	129,2	10	684
Carbón activado de Bituminoso - floculación - 2 mg/l	8,1	0,98	2	101,9	14	728
Carbón activado de Bituminoso - floculación - 5 mg/l	8,1	1,03	1	107	16	804
Carbón activado de Bituminoso - floculación - 8 mg/l	8,1	1,2	1	100,4	14	740
Carbón activado de Madera - floculación - 2 mg/l	8,0	0,62	2	130,1	9	609
Carbón activado de Madera - floculación - 5 mg/l	8,0	0,59	2	129,6	12	693
Carbón activado de Madera - floculación - 8 mg/l	8,1	1,97	4	99,1	12	749

Coagulante usado: sulfato de aluminio; ayudante Fuente: Autor.

Se confirma la capacidad del carbón activado en la remoción de la turbiedad y color, donde para este ultimo se dan colores mas altos, pero sin salirse del rango permitido (<15 UPC). La adición de la poliacrilamida afecta levemente el pH incrementando 0,3 UNT para las dosis de 2 y 5 mg/L de cáscara de coco, mientras que para las demas muestras se mantiene practicamente estable.

En la gráfica 6 se evidencia el porcentaje de remoción alcanzado para cada compuesto según la dosis de carbón activado y la adición de la poliacrilamida.

Gráfica 6. Porcentaje de remoción del CAP con adición de poliacrilamida.



Fuente: Autor.

En la segunda concentración de geosmina y MIB, se adicionó poliacrilamida, usado para actuar sobre los elementos quienes afectan la coagulación, a su vez que puede aumentar la densidad del floc, y por consiguiente mejorar la sedimentación (Aguilar et al. 2005). Este polímero influyó en el desempeño de los carbones activados, al

obtener las mejores remociones de geosmina y MIB en el carbón de origen vegetal para la dosis de 2 mg/L; no obstante, las dosis de 5 y 8 mg/L se mantuvieron dentro del promedio general de remoción. El carbón de origen mineral se vió afectado por la adición de la poliacrilamida al obtener el peor desempeño (33% de remoción de geosmina y 17% de remoción de MIB) en las tres dosis evaluadas, una posible explicación vista en el laboratorio fue una mayor sedimentación en este tipo de carbón al preparar las dosis en las jeringas, sin embargo, no se pudo comparar las densidades de los tres tipos de carbones debido a que las empresas distribuidoras de estos adsorbentes no disponían de los datos. El carbón activado de cáscara de coco fue el menos afectado por el adiconamiento del polímero; por lo tanto, sería el adsorbente más idóneo para usar en la planta, llegado el caso de hacer uso de un ayudante de floculación.

Al igual que en las muestras analizadas sin la adición de la poliacrilamida, se presentaron inconsistencia en la dosis de 5 mg/L para los carbones bituminoso y coco (ver gráfica 9), donde su porcentaje de remoción es menor que en la dosis más baja; sin embargo, esta situación no se observó para la dosis más alta empleada en los mismos tipos de carbones previamente mencionados, dado que los porcentajes de remoción de geosmina y MIB fueron similares a los vistos en la dosis de 2 mg/L.

Se considera que la geosmina tiene una mejor adsorción que el MIB, por lo tanto, se permitiría usar este último como un indicador para el desempeño cuando los dos compuestos están presentes (*Summers et al. 2013*), ahorrando recursos económicos y tiempo.

Los bajos porcentajes de remoción obtenidos se deben básicamente a dos aspectos; el primero son las bajas dosis usadas, que, aunque son las aplicadas actualmente en la PTAP Bosconia, son ineficientes para suprimir los causantes del mal olor y sabor en el agua. El segundo aspecto es el punto de aplicación; al ser aplicado en la floculación, el carbón activado no tiene suficiente tiempo ni mezcla para alcanzar su equilibrio de adsorción (*Rescorla et al. 2017*). Así pues, el punto óptimo para aplicar el carbón activado sería en el pretratamiento, con un tiempo aproximadamente de 42 minutos adicionales donde tendría mayor tiempo de contacto con los compuestos generadores de mal sabor en el agua.

5.2. Evaluación del carbón activado granular en un lecho fijo.

La implementación del carbón activado granular se hace cuando los episodios de sabor y olor en el agua son constantes, y, por lo tanto, resulta en ahorros económicos al evitar el uso del carbón activado en polvo constantemente. (Summers et al. 2013)

En la tabla 12, se expone los resultados de la catación para una concentración de 35 y 1000 ng/L de geosmina y MIB respectivamente, con la implementación del carbón activado granular en un lecho fijo.

Tabla 12. Resultados de catación para 35 ng/L de geosmina y 1000 ng/L de MIB en un lecho fijo de CAG.

Muestra	Sabe	No sabe	B	M	A	Tierra	Moho	Tierra y moho
C	7	0	2	1	4	6	1	
B	6	1	1	3	2	3	2	1
N	7	0	0	3	4	3	2	2
A	7	0	1	3	3	4	2	1

CAG: Carbón activado granular; C: cáscara de coco; B: Bituminoso; N; cáscara de nuez; A: Antracita. Sabe: percepción de sabor. B, M, A se refieren a la Intensidad de percepción (Baja, Media y Alta respectivamente). Tierra: sabor característico de la geosmina; Moho: sabor característico del MIB.

Fuente: Autor

El carbón activado granular bituminoso tendió a presentar mejores resultados que el carbón en polvo a una concentración inicial de 35 ng/L y 1000 ng/L para geosmina y MIB respectivamente. La comparación se hace teniendo en cuenta la concentración remanente de las muestras del carbón en polvo (700 ng/L promedio) con el umbral de sabor de la geosmina y MIB que están alrededor de los 10 ng/L. Esta afirmación se basó en las percepciones de los catadores, quien uno de ellos no percibió sabor y otro lo describió con una intensidad baja. Estos resultados se deben a la composición química superficial, pues presenta el menor porcentaje de oxígeno (ver Anexo 8) además de contener azufre (Matsui et al. 2015).

El carbón granular de cáscara de coco no obtuvo un buen desempeño al obtener cuatro percepciones altas. Esta inferioridad con respecto al bituminoso se debe a un mayor contenido de oxígeno (ver anexos 8 y 12), teniendo así un carácter más hidrofílico. El carbón activado de cáscara de nuez no se le pudo hacer el análisis EDS debido a su dureza física, por lo tanto, la razón de su desempeño queda sin saberse.

Al tener una concentración de 1000 ng/L de MIB se esperaría que los catadores percibieran un sabor mohoso con mayor facilidad que el terroso; sin embargo, la mayoría de los catadores describieron un sabor a tierra, siendo característico de la geosmina. Esto podría ocurrir por el hecho de que el MIB puede percibirse como un sabor a cloro a altas concentraciones (Whelton & Dietrich 2004), camuflando su sabor y olor, de tal forma que la mayoría de los participantes pudiera percibir el sabor a tierra, aun estando a una concentración muy baja.

El uso de carbón activado granular no es suficiente para suprimir las concentraciones de MIB y geosmina por debajo del umbral (<10 ng/L), (Elhadi et al. 2006) menciona la posibilidad de alcanzar grandes remociones, siempre y cuando vaya seguido de un proceso de ozonificación; además menciona las ventajas del carbón activado biológico, el cual puede ser más efectivo que un carbón granular nuevo, debido a la biopelícula que se forma en la superficie, donde seguramente habrán comunidades microbianas degradadoras de geosmina y MIB (Walker & Weatherley 1998); estas comunidades microbianas son *Pseudomonas* spp., *Bacillus cereus*, *Enterobacter* spp., y *Flavobacterium* spp. (Elhadi et al. 2006).

En las tablas 13 y 14 se muestran las propiedades fisicoquímicas de las dos concentraciones de geosmina y MIB.

Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas de CAG para la primera concentración de geosmina y MIB.

Concentración (mg/L)	Filtro	pH	Turbiedad (UNT)	Conductividad (µs/cm)	Color (UPC)
Geosmina (35) MIB (1000)	C	9,10	1,35	186,6	7
	B	8,66	0,75	89,3	7
	N	8,80	1,69	99,7	14
	A	8,55	1,07	95,4	5

CAG: Carbón activado granular; C: cáscara de coco; B: Bituminoso; N; cáscara de nuez; A: Antracita.

Fuente: Autor

Tabla 14. Propiedades fisicoquímicas de CAG para la segunda concentración de geosmina y MIB.

Concentración (ng/L)	Filtro	pH	Turbiedad (UNT)	Conductividad (μs/cm)	Color (UPC)
Geosmina (150) y MIB (150)	C	9,18	1,00	147,6	9
	B	8,70	0,41	88,1	11
	N	8,14	2,87	118,9	15
	A	8,15	0,60	92,8	9

CAG: Carbón activado granular; C: cáscara de coco; B: Bituminoso; N; cáscara de nuez; A: Antracita.
Fuente: Autor

El carbón bituminoso presentó las mejores remociones de sólidos suspendidos y disueltos, posiblemente a su carácter menos hidrofílico pudo remover más sustancias, ya sean causantes de mal sabor o sólidos presentes en el agua. El carbón de coco presentó los valores más altos de conductividad, actuando de manera opuesta al bituminoso, debido a que tiene mayor porcentaje de oxígeno en su superficie (ver Anexos 8 y 13), donde el agua compite por los puestos de adsorción. El carbón de cascara de nuez obtuvo las cifras más altas de turbiedad y color, siendo el más deficiente en todos los aspectos evaluados. La antracita tuvo un buen rendimiento para la remoción de color y turbiedad, siendo muy predecible en este caso, porque la mayoría de los filtros usados en las plantas de agua potable convencionales están compuestos de grava, arena y antracita (Elhadi et al. 2006).

Tabla 15. Resultados de catación para 150 ng/L de geosmina y 150 ng/L de MIB en un lecho fijo de CAG.

Muestra	Sabe	No sabe	B	M	A	Tierra	Moho	Tierra y moho
C	6	1	2	2	2	1	3	2
B	2	5	1	1	0		2	
N	7	0	1	3	3	2	3	2
A	7	0	4	2	1	3	4	

CAG: Carbón activado granular; C: cáscara de coco; B: Bituminoso; N; cáscara de nuez; A: Antracita.
 Sabe: percepción de sabor. B, M, A se refieren a la Intensidad de percepción (Baja, Media y Alta respectivamente). Tierra: sabor característico de la geosmina; Moho: sabor característico del MIB.
Fuente: Autor.

Se confirmó que el carbón bituminoso fue más eficiente en la remoción de los generadores del mal sabor en el agua, al tener una concentración inicial de 150 ng/L tanto de geosmina como MIB simulando el valor que en muchos casos es el referido a darse en condiciones naturales. Dos catadores percibieron un sabor mohoso a concentración baja y media (ver en Anexo 6). Una de las catadoras reside en el barrio La Floresta, cuyo sector lo abastece la PTAP de La Flora; según el acueducto metropolitano de Bucaramanga esta planta no ha tenido problemas de mal sabor

(*Acueducto Metropolitano de Bucaramanga 2015*), por lo que esta persona no estaba sesgada en su decisión al no estar expuesta a un sabor terroso-mohoso por largos periodos.

Por su parte, el otro catador reside en el barrio Toledo Plata cerca a la localización de Malpaso (*Secretaria de Planeación 2018*), donde hay un tanque de almacenamiento de agua potable que lleva el mismo nombre y su abastecimiento es compartido por tres PTAP del área metropolitana de Bucaramanga (Bosconia, Morrórico y Floridablanca), debido a que la planta de Bosconia surte al tanque de la planta de Morro rico por medio de una estación de bombeo, a su vez la planta de Morrórico abastece el tanque Morro Bajo que conecta con el tanque de Malpaso; para suplir toda la demanda del distrito de Malpaso, la planta de Floridablanca lo abastece también (*Almeyda 2002*). Por lo que se supone que, en ocasiones, este catador puede estar percibiendo un sabor moho-terroso en su residencia un poco diluido por el agua proveniente de río Frío, de ahí su percepción más baja respecto a la otra catadora.

Los demás catadores que no percibieron sabor con el filtro de carbón activado granular bituminoso, residen en varios sectores del área metropolitana, uno de ellos se hospeda en Diamante que lo abastece la planta de Bosconia, la posible explicación a que no percibiera geosmina o MIB es su adaptación al sabor, puesto que esos sabores han estado presentes desde el año 2013 (*Acueducto Metropolitano de Bucaramanga 2015*). Tres de ellos residen en Floridablanca y otro en Piedecuesta (Refugio), donde no se han presentado quejas referentes a parámetros estéticos y/u organolépticos.

Una de las muestras que fueron filtradas por el CAG de cáscara de coco, solo presentó una remoción total según la percepción de una catadora (ver Anexo 5), mientras que los otros seis participantes estuvieron divididos en la decisión al tener dos percepciones por cada intensidad; estos resultados tendrían que ver con la composición química superficial del carbón granular; cómo se puede ver en el Anexo, los elementos químicos no están distribuidos uniformemente, por ejemplo, en una de las muestras de las analizadas en el microscopio electrónico de barrido, el porcentaje de nitrógeno es considerable (7%), recobra importancia al ser uno de los elementos más influyentes en la adsorción del carbón activado (*Matsui et al. 2015*); mientras que en la otra muestra se sustituye por hierro y aluminio además de virar el contenido de carbono.

El carbón de peor desempeño fue de cascara de nuez pues todos los catadores percibieron sabor, quienes en su mayoría describieron este sabor a una concentración media o fuerte; a esto se le suma ser el único carbón al cual no se le pudo analizar su composición química debido a su dureza. Es inesperado este resultado porque inclusive la antracita obtuvo mejores respuestas en cuanto a la concentración percibida, pues se esperaría que el carbón activado con las características morfológicas que lo diferencian de otros adsorbentes como son los microporos, presentara mejores resultados.

Al haber concentraciones iguales de geosmina y MIB, se puede apreciar la mejor adsorción que tiene esta primera en el carbón activado, por el menor número de percepciones de un sabor terroso. Esta ventaja que se presenta se justifica al hecho que la geosmina tiene una solubilidad levemente inferior, peso molecular más bajo y una estructura más plana en relación al MIB (Yang et al. 2010)

6. CONCLUSIONES.

- La selección de los carbones activados utilizados en este proyecto se basó en la divulgación científica de artículos y la disponibilidad comercial en Colombia. Los carbones en polvo fueron bituminoso, cáscara de coco y madera; mientras que para el granular fueron bituminoso, cáscara de coco y de cáscara de nuez.
- El uso del carbón activado puede llegar a generar alteraciones en las propiedades fisicoquímicas del agua, siendo la conductividad la de mayor riesgo de aumentar su valor; el pH tiende a disminuir levemente cuando se aplica solamente el adsorbente ya sea en polvo o granular. No obstante, al adicionarlo junto con el ayudante de coagulación este tiende a aumentar.
- Se presentó una proporcionalidad entre la dosis del carbón activado en polvo y la concentración de geosmina y MIB. Dosis altas del adsorbente fueron necesarias para remover concentraciones de 50 y 150 ng/L de los causantes del mal sabor en el agua; para concentraciones menores, el uso de estas dosis incurriría en pérdidas del material además de no ser tan eficiente en la remoción de estos compuestos.
- Los bajos porcentajes de remoción obtenidos para las dosis y punto de aplicación que se llevan a cabo actualmente en la PTAP Bosconia, se debe básicamente a dos aspectos: Las dosis usadas resultaron bajas e ineficientes para suprimir los causantes del mal olor y sabor en el agua. El segundo aspecto es el punto de aplicación; al ser aplicado en la floculación, el carbón activado no tiene suficiente tiempo ni mezcla para alcanzar su equilibrio de adsorción. Así pues, el punto óptimo para aplicar el carbón activado sería en el pretratamiento, con un tiempo aproximadamente de 30 minutos donde el adsorbente no esté en contacto con el coagulante.
- Los carbones de cáscara de coco en polvo y bituminoso para el granular, obtuvieron el mejor desempeño en la remoción de geosmina y MIB; esto estuvo ligado a un menor contenido de oxígeno en la superficie química del

adsorbente, teniendo una mejor afinidad ante estos dos compuestos generadores de sabor y olor por su característica a ser hidrófobos.

7. RECOMENDACIONES.

- Para próximos estudios se aconseja lavar los filtros convencionales en igualdad de condiciones, debido a que puede afectar los resultados de turbiedad de las muestras, si uno de los filtros tuviera un lavado menos. Es importante verificar la turbiedad de los filtros al inicio de las pruebas, más aún si son de un día para otro, pues cuando se secan, la turbiedad tiende a subir.
- Se recomienda implementar pruebas rápidas de columna a pequeña escala (RSSCT por sus siglas en inglés) para el carbón activado granular, con el fin de evaluar la vida útil del lecho fijo y la influencia de la biopelícula en la degradación de los compuestos generadores de mal sabor y olor en el agua.
- Hacer más pruebas variando mayor cantidad de concentraciones de geosmina y MIB, dosis de carbón activado, con el fin de cerciorarse la no afectación de la conductividad por encima de los rangos permitidos.
- Se recomienda hacer simulacros con los catadores para ir seleccionando lo más idóneos al momento de describir sus percepciones, con la finalidad de que los resultados no presentes sesgos por la ubicación de sus residencias y posibles acostumbramientos a sabores y/o olores propuestos.
- Incluir dentro de los parámetros fisicoquímicos el contenido de materia orgánica natural, de tal forma que los resultados de laboratorio sean más cercanos a lo esperado en la aplicación a escala real, pues este compite por los puestos de adsorción del carbón activado con el MIB y la geosmina.
- Se sugiere para próximos estudios, implementar la adsorción de nitrógeno en los carbones activados, con el fin de determinar la cantidad de microporos, pues la adsorción de los compuestos depende de esta propiedad y de la composición química superficial.

8. BIBLIOGRAFIA.

- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2015. Informe de Sustentabilidad.
- Acuña, D., 2008. Modelo De Correlación Entre Las Variables Medibles En Línea Que Afectan El Proceso De Determinación De La Dosis Óptima De Coagulante En La Planta De Tratamiento De Agua Potable De Bosconia, Del Acueducto Metropolitano De Bucaramanga S.a. E.S.P. , p.133.
- Aguilar, M.I. et al., 2005. Improvement of coagulation-flocculation process using anionic polyacrylamide as coagulant aid. *Chemosphere*, 58(1), pp.47–56.
- Almeyda, W., 2002. *Evaluación del riesgo sísmico del sistema de acueducto de Bucaramanga a partir del estudio de microzonificación sísmica indicativa de Bucaramanga- Colombia*,
- Bamuza-Pemu, E. & Chirwa, E., 2012. Photocatalytic degradation of geosmin: Reaction pathway analysis. *Water SA*, 38(5), pp.689–696. Available at: <http://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/82871>.
- Bansal, R.C., Donnet, J.B. & Stoeckli, F., 1988. *Activated Carbon*, Journal AWWA.
- Blanco, G. & Wilson, D., 2017. *Evaluación de las etapas de Coagulación, filtración y desinfección en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Bosconia en Bucaramanga, Santander bajo los lineamientos del análisis del ciclo de vida*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Chen, G., Dussert, B.W. & Suffet, I.H., 1997. Evaluation of granular activated carbons for removal of methylisoborneol to below odor threshold concentration in drinking water. *Water Research*, 31(5), pp.1155–1163.
- Chen, X. et al., 2013. Simultaneous determination of ten taste and odor compounds in drinking water by solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 25(11), pp.2313–2323. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60290-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60290-3).
- Chowdhury, Z. et al., 2013. *Activated carbon: solutions for improving water quality* L. B. Passantino, ed., Denver, Colorado: American Water Works Association. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed023p98>.
- 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. *Water Research*, 35(5), pp.1325–1333.
- Danish, M. et al., 2018. Comparison of surface properties of wood biomass activated carbons and their application against rhodamine B and methylene blue dye. *Elsevier*, 11(Surfaces and Interfaces), pp.1–13.
- Elhadi, L.N.S., Huck, M.P. & Slawson, M.R., 2006. Factors affecting the removal of geosmin and MIB in drinking water biofilters. *Journal AWWA*, 16(3), pp.381–389.
- EPA, 2015. Drinking Water Contaminant Candidate List 4. , 80(23), pp.6076–6084.

- Ferreira, S., Marchetto, M. & Alves, R., 2013. Interference of iron as a coagulant on MIB removal by powdered activated carbon adsorption for low turbidity waters. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 25(8), pp.1575–1582.
- González, P. et al., 1980. Una aplicación del análisis de componentes principales en el área educativa. *Economía*, 9, p.18.
- Hanbai Park, 2013. Removal of Geosmin and 2-Methylisoborneol using algacides and chemicals in potable water. *Oklahoma State University, PHD Thesis*.
- Ho, L. & Newcombe, G., 2005. Effect of NOM, turbidity and floc size on the PAC adsorption of MIB during alum coagulation. *Water Research*, 39(15), pp.3668–3674.
- Ho, L., Sawade, E. & Newcombe, G., 2012. Biological treatment options for cyanobacteria metabolite removal - A review. *Water Research*, 46(5), pp.1536–1548. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.018>.
- Ipohorski, M. & Bozzano, P.B., 2013. Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e Investigación*, 63(3), pp.43–53.
- Jeguirim, M. et al., 2018. Adsorption/reduction of nitrogen dioxide on activated carbons: Textural properties versus surface chemistry – A review. *Chemical Engineering Journal*, 347(April), pp.493–504.
- Kim, C. et al., 2014. Removal of geosmin and 2-methylisoborneol (2-MIB) by membrane system combined with powdered activated carbon (PAC) for drinking water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 4(C), pp.91–98. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.09.006>.
- Matsui, Y. et al., 2015. Adsorption capacities of activated carbons for geosmin and 2-methylisoborneol vary with activated carbon particle size: Effects of adsorbent and adsorbate characteristics. *Water Research*, 85, pp.95–102. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.017>.
- Matsui, Y. et al., 2013. Natural organic matter that penetrates or does not penetrate activated carbon and competes or does not compete with geosmin. *Separation and Purification Technology*, 113, pp.75–82. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2013.04.009>.
- Ministerio de la Protección Social & Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007. Resolución Numero 2115. *Minambiente*.
- Ministry of Health, 2015. *Guidelines for Quality Management for New Zealand*, Wellington: Ministry of Health.
- de Moel, P., Verberk, J. & van Dijk, J., 2006. *Drinking Water principles and practices* T. Kwang, ed., London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Najm, I., Kennedy, M. & Naylor, W., 2005. Lignite versus bituminous GAC for biofiltration. *American Water Works Association*, (July 2002), pp.94–101.

- OMS, 2012. Guías para la calidad del agua de consumo humano. Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/es/.
- OMS, 1995. Guías para la calidad del agua potable. , p.98,99,100,102.
- Pendleton, P. et al., 1997. Properties of activated carbon controlling 2-methylisoborneol adsorption. *Carbon*, 35(8), pp.1141–1149.
- Pereira Bonilla, D.J., Urrego Mondragón, J.A. & Martínez Vanegas, N., 2017. Informe sectorial: Agua potable y Saneamiento básico. , p.13.
- Ratnayaka, D.D., Brandt, M.J. & Johnson, K.M., 2009a. Specialized and Advanced Water Treatment Processes. In *Water Supply*. pp. 365–423. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750668439000184>.
- Ratnayaka, D.D., Brandt, M.J. & Johnson, K.M., 2009b. Water Filtration Granular Media Filtration. In *Water Supply*. pp. 315–350. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750668439000160>.
- Rescorla, A., Semmens, M.J. & Hozalski, R.M., 2017. Effect of NOM and lime softening on Geosmin removal by PAC. *Journal - American Water Works Association*, 109(4), pp.15–26.
- Romero, J.A., 2002. *calidad del agua primera.*, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J.A., 1999. *Potabilización del agua* 3rd ed. Alfaomega, ed., Mexico.
- Satyawali, Y. & Balakrishnan, M., 2007. Removal of color from biometanated distillery spentwash by treatment with activated carbons. *Bioresource Technology*, 98(14), pp.2629–2635.
- Secretaria de Planeación, 2018. División Político Urbana – Bucaramanga. *Alcaldía de Bucaramanga*. Available at: <https://www.bucaramanga.gov.co/el-mapa/division-politico-urbana/> [Accessed July 8, 2018].
- Sierra, C.A., 2011. características físicas, químicas y biológicas del agua. In L. D. López, ed. *calidad del agua evaluación y diagnóstico*. Medellín, pp. 47–90.
- Spellman, F. & Drinan, J., 2000. *Manual del agua potable*, Zaragoza: ACRIBIA, S.A.
- 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), pp.1–13. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60367-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60367-1).
- Summers, R.S. et al., 2013. Granular activated carbon adsorption of MIB in the presence of dissolved organic matter. *Water Research*, 47(10), pp.3507–3513. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.054>.
- Walker, G.M. & Weatherley, L.R., 1998. Bacterial regeneration in biological activated carbon systems. *Process Safety and Environmental Protection*, 76(2), pp.177–182.
- Wang, A.Q. et al., 2018. Factors affecting the water odor caused by chloramines during drinking water disinfection. *Science of the Total Environment*, 639, pp.687–694. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.188>.

- Watson, S.B. et al., 2016. Biochemistry and genetics of taste- and odor-producing cyanobacteria. *Harmful Algae*, 54, pp.112–127. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hal.2015.11.008>.
- Whelton, A.J. & Dietrich, A.M., 2004. Relationship between intensity, concentration, and temperature for drinking water odorants. *Water Research*, 38(6), pp.1604–1614.
- Worch, E., 2016. *Adsorption Technology In Water Treatment. Fundamentals, Processes, and Modeling* DE GRUYTER, ed., Dresden, Germany.
- Yang, J.S., Yuan, D.X. & Weng, T.P., 2010. Pilot study of drinking water treatment with GAC, O3/BAC and membrane processes in Kinmen Island, Taiwan. *Desalination*, 263(1–3), pp.271–278. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2010.06.069>.
- Yu, J. et al., 2007. Effects of surface characteristics of activated carbon on the adsorption of 2-methylisobornel (MIB) and geosmin from natural water. *Separation and Purification Technology*, 56(3), pp.363–370.
- Yu, J. et al., 2016. Prediction of powdered activated carbon doses for 2-MIB removal in drinking water treatment using a simplified HSDM approach. *Chemosphere*, 156, pp.374–382.
- Zhou, W., Apkarian, R.P. & Wang, Z.L., 2007. Fundamentals of Scanning Electron Microscopy. *Scanning Microscopy for Nanotechnology*, pp.1–40.
- Zoschke, K. et al., 2011. Adsorption of geosmin and 2-methylisoborneol onto powdered activated carbon at non-equilibrium conditions: Influence of NOM and process modelling. *Water Research*, 45(15), pp.4544–4550.

9. ANEXOS

Anexo 1. Percepciones de los catadores para 1.5 ng/L de geosmina y 6.5 ng/L de MIB.

Muestra	Sabe	No Sabe	B	M	A	Tierra	Moho
M7	1	6	0	1	0		1
M15	0	7	0	0	0		
M30	3	4	1	1	1	2	1
M40	5	2	2	3	0	4	1
B7	4	3	1	1	2	2	2
B15	1	6	0	1	0		1
B30	1	6	1	0	0		1
B40	2	5	1	0	1	1	1
C7	1	6	1	0	0	1	
C15	4	3	3	1	0	3	1
C30	3	4	2	1	0	2	1
C40	3	4	2	1	0	2	1
Blanco	6	1	0	4	2	4	2

Fuente: Autor

Anexo 2. Percepciones de los catadores para 10 ng/L de geosmina y 10 ng/L de MIB.

Muestra	Sabe	No Sabe	B	M	A	Tierra	Moho
M7	1	6	0	0	1	1	
M15	4	3	3	0	1	3	1
M30	5	2	3	1	1	3	2
M40	7	0	3	1	3	5	2
B7	2	5	1	1	0	2	
B15	7	0	3	1	3	4	3
B30	4	3	3	1	0	2	2
B40	5	2	3	0	2	4	1
C7	1	6	1	0	0		1
C15	2	5	2	0	0	1	1
C30	1	6	0	0	1		1
C40	3	4	1	2	0	3	
Blanco	7	0	0	2	5		7

Fuente: Autor

Anexo 3. Percepciones de los catadores para 50 ng/L de geosmina y 50 ng/L de MIB.

Muestra	Sabe	No Sabe	B	M	A	Tierra	Moho
M7	7	0	1	4	2	7	
M15	6	1	1	3	2	5	1
M30	4	3	2	2	0	4	
M40	3	5	1	2	0	3	
B7	7	0	3	1	3	7	
B15	7	0	4	2	1	7	
B30	2	5	2	0	0	2	
B40	5	2	2	0	3	4	1
C7	4	3	3	1	0	4	
C15	5	2	4	1	0	4	1
C30	2	5	1	0	1	2	
C40	2	5	1	1	0	2	
Blanco	7	0	3	3	1	5	2

Fuente: Autor

Anexo 4. Percepciones de los catadores para 150 ng/L de geosmina y 150 ng/L de MIB.

Muestra	Sabe	No Sabe	B	M	A	Tierra	Moho
M7	6	1	3	2	1	5	1
M15	5	2	2	2	1	3	2
M30	2	5	2	0	0	2	
M40	1	6	0	0	1		1
B7	4	3	2	2	0	1	3
B15	5	2	0	5	0	3	2
B30	3	4	1	2	0	3	
B40	3	4	3	0	0	2	1
C7	6	1	0	3	3	6	
C15	7	0	1	2	4	5	2
C30	4	3	2	1	1	3	1
C40	1	6	1	0	0	1	
Blanco	5	2	1	1	3	4	1

Fuente: Autor

Anexo 5. Catación detallada de la primera concentración de geosmina y MIB para el CAG

PERSONAS		1	2	3	4	5	6	7		1	2	3	4	5	6	7		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Concentración (mg/L)	GAC	No Sabe							#	Sabe							#	Intensidad							Sabor						
Geosmina 35; MIB 1000	coco							0	1	1	1	1	1	1	1	7	8	8	8	8	4	4	7	cloro	tierra	tierra	tierra	tierra	tierra	tierra	
	bitum				1			1	1	1	1	1		1	1	6	9	5	5	10		3	5	tierra-cloro	cloro	tierra	cloro		tierra	tierra	
	nuez							0	1	1	1	1	1	1	7	6	10	10	6	9	4	9	tierra-cloro	tierra	cloro	cloro-tierra	tierra	moho	tierra		
	antra							0	1	1	1	1	1	1	7	4	10	7	8	10	2	6	tierra-cloro	tierra	tierra	cloro	tierra	moho	tierra		

Fuente: Autor.

Anexo 6. Catación detallada de la segunda concentración de geosmina y MIB para el CAG

PERSONAS		1	2	3	4	5	6	7		1	2	3	4	5	6	7		1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
Concentración (mg/L)	GAC	No Sabe							#	Sabe							#	Intensidad							Sabor						
Geosmina y MIB 150	coco			1				1	1	1		1	1	1	1	6	5	3		10	10	4	3	cloro	cloro		tierra-moho	moho-tierra	cloro	dulce	
	bitum	1	1		1	1		1	5			1		1		2			5			1				moho			moho		
	nuez							0	1	1	1	1	1	1	1	7	1	6	8	7	9	6	10	tierra	tierra-cloro	cloro	cloro	cloro	dulce	tierra	
	antra							0	1	1	1	1	1	1	1	7	1	6	8	7	3	2	1	tierra	cloro	cloro	cloro	tierra	moho	tierra	

Fuente: Autor.

Anexo 7. Lugar de residencia de los catadores mediante el uso de CAG.

NOMBRES	DIRECCIÓN
1. Andrea Gomez.	Avenida 87 # 25-50 Diamante
2. Natalia Ariza.	Calle 113 # 33A-41 Zapamanga
3. Paula Grecco.	Calle 66 # 46-13 La Floresta
4. Carlos Gomez.	Calle 197 A # 33-117 Floridablanca
5. Tatiana Villalba.	Cra 3 # 2N15 Refugio
6. Ismael Cubillos.	Calle 107 B # 15B-33 Toledo Plata
7. Katty Sawrith.	Calle 200 # N 14-50 Altos de Aranjuez (Floridablanca)

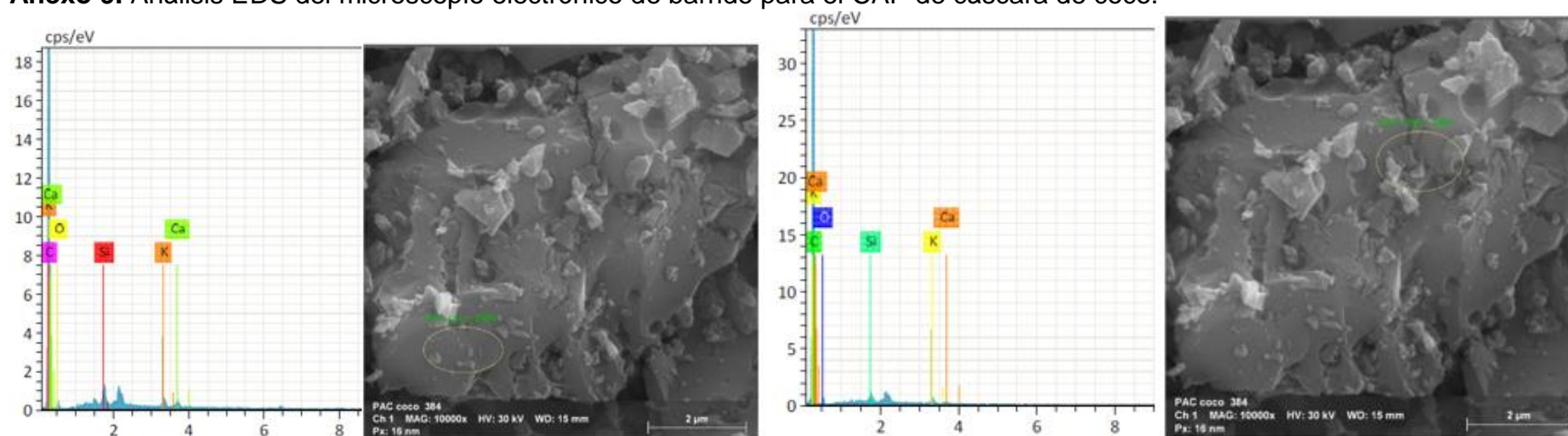
Fuente: Autor.

Anexo 8. Composición química superficial de materiales usados en el lecho fijo.

Muestra	ELEMENTOS [% masa]									
	Carbono	Oxigeno	Potasio	Calcio	Silice	Nitrogeno	Hierro	Azufre	Aluminio	Manganeso
GAC coco	75,71	14,53	1,79	-	0,26	7,71	-	-	-	-
GAC coco	83,27	12,68	2,34	-	0,41	-	1,08	-	0,21	-
GAC bitum	86,81	11,05	-	0,43	0,75	-	-	0,79	0,17	-
GAC bitum	86,89	11,49	-	0,36	0,54	-	-	0,53	0,19	-
Antracita	10,91	44,96	0,37	0,82	9,04	-	1,62	-	18,91	9,37
Antracita	14,4	46,91	-	0,92	7,85	-	1,72	-	17,74	10,46

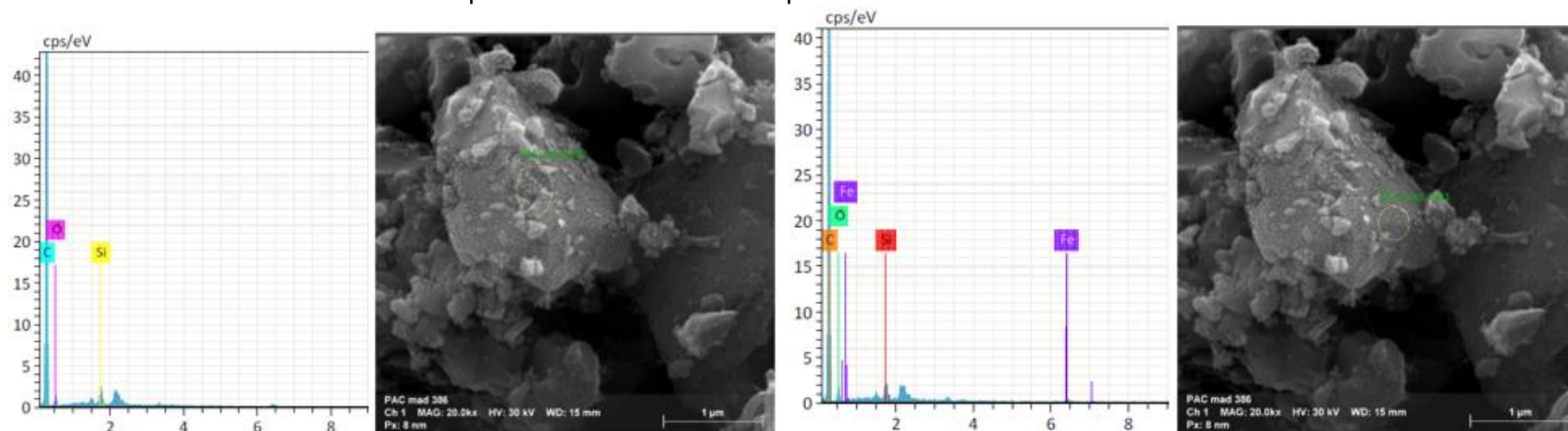
Fuente: Autor.

Anexo 9. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido para el CAP de cáscara de coco.



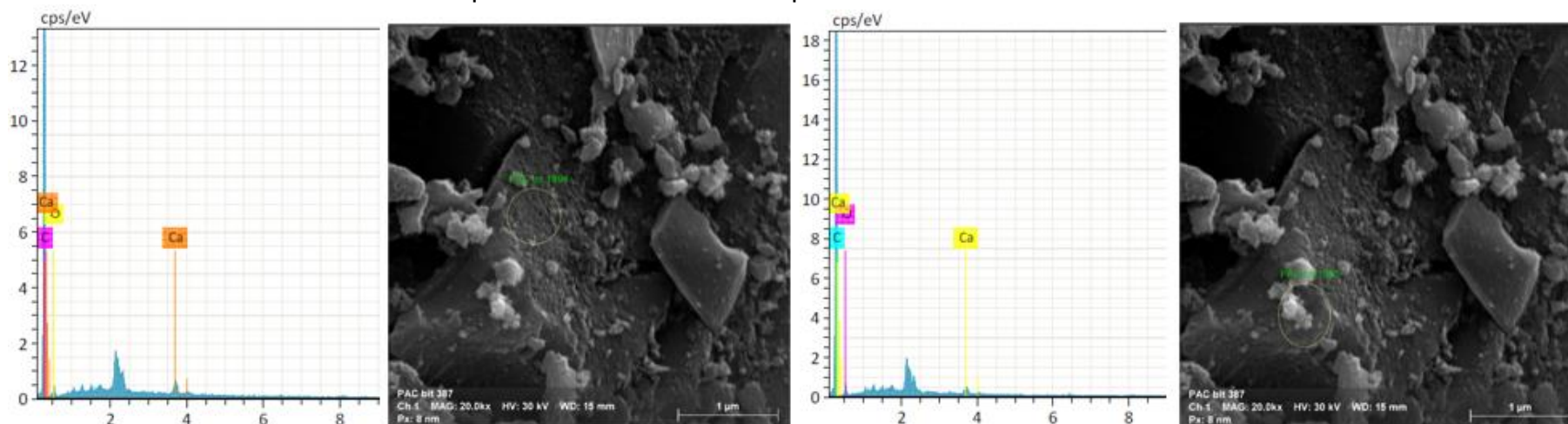
Fuente: Autor.

Anexo 10. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido para el CAP de madera.



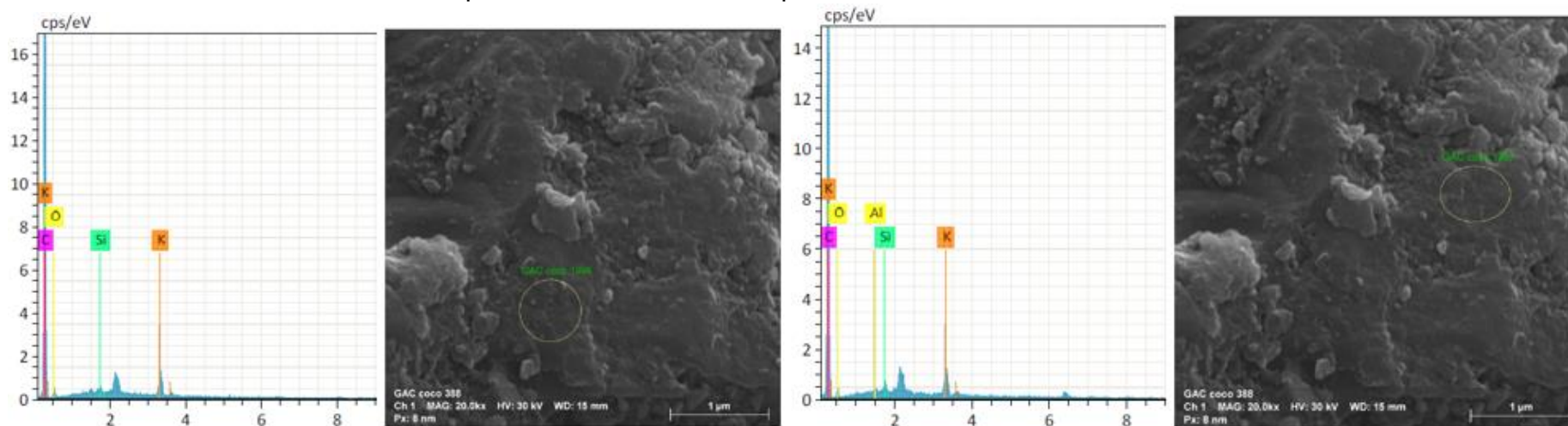
Fuente: Autor.

Anexo 11. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido para el CAP bituminoso.



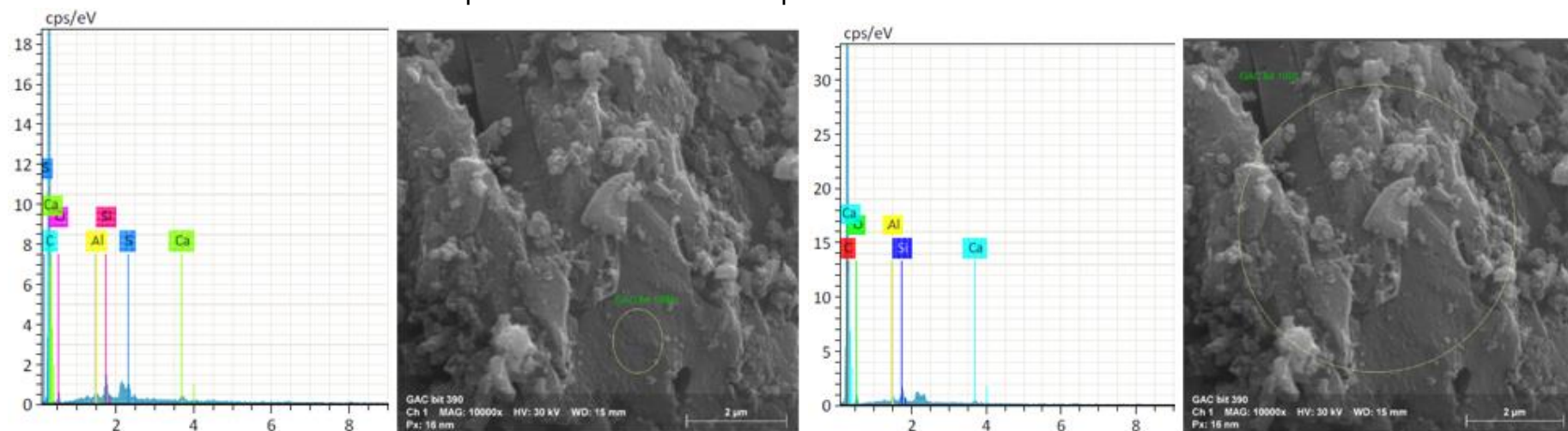
Fuente: Autor.

Anexo 12. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido para el CAG de cáscara de coco.



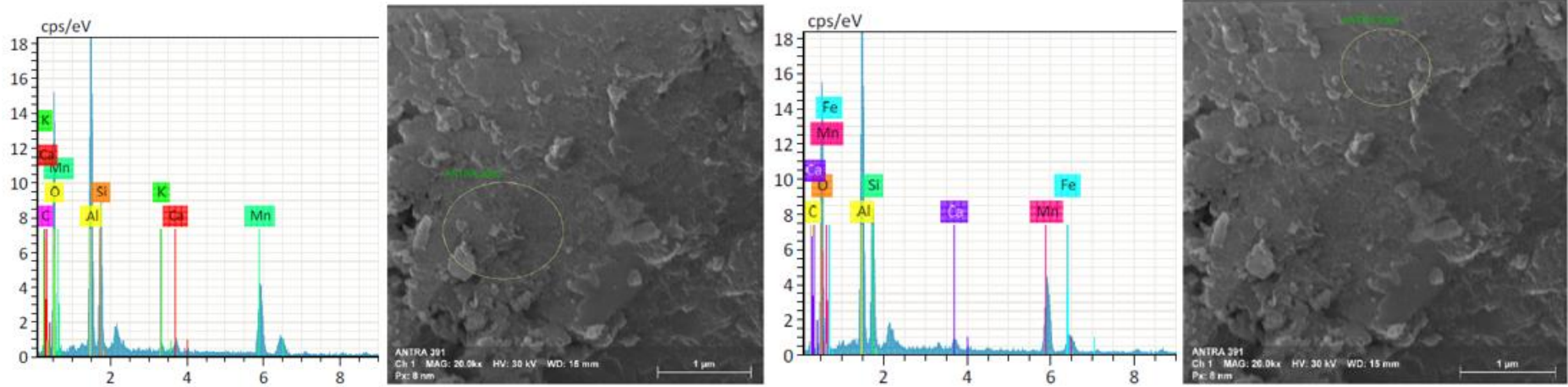
Fuente: Autor.

Anexo 13. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido para el CAG bituminoso.



Fuente: Autor.

Anexo 14. Análisis EDS del microscopio electrónico de barrido para la antracita.



Fuente: Autor.