

**VIABILIDAD TÉCNICA DEL BENEFICIO DE CARBONES COLOMBIANOS DE
ALTO RANGO POR FLOTACIÓN ESPUMANTE**

**LUISA FERNANDA ERAZO FUERTES
SANTIAGO ORTIZ ERAZO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CALI, COLOMBIA**

2025

**VIABILIDAD TÉCNICA DEL BENEFICIO DE CARBONES COLOMBIANOS DE
ALTO RANGO POR FLOTACIÓN ESPUMANTE**

**LUISA FERNANDA ERAZO FUERTES
SANTIAGO ORTIZ ERAZO**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

**DIRECTOR:
MATEO RAMOS VELASCO.
CO-DIRECTOR:
JUAN SEBASTIÁN GUERRERO, Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CALI, COLOMBIA**

2025

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Valle, por brindarnos las herramientas para continuar en este camino del aprendizaje junto a los mejores.

Al profesor Juan Manuel Barraza, director del grupo de Investigación Ciencia y Tecnología del Carbono, por aceptarnos como estudiantes y poder desarrollar nuestro trabajo de grado.

Al Ingeniero Químico Mateo Ramos Velasco, director del trabajo de grado, por aceptarnos como estudiantes y orientarnos durante el desarrollo de este trabajo.

Al profesor Juan Sebastián Guerrero, co-director del trabajo de grado, por sus orientaciones y constantes aportes durante todo el desarrollo de este trabajo.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Química, quienes con sus enseñanzas nos han instruido pacientemente para alcanzar nuestras metas durante todo nuestro proceso académico.

Al grupo de Investigación Ciencia y Tecnología del Carbono y a todos sus miembros, por la disposición y el apoyo brindado durante el desarrollo de la parte experimental de nuestro trabajo de grado.

Al Servicio Geológico Colombiano, por sus aportes con los análisis y datos requeridos para este trabajo de grado.

RESUMEN

Este trabajo de investigación evaluó la viabilidad técnica del proceso de flotación-espumante para el beneficio de tres carbones colombianos de alto rango, provenientes de los municipios de Capitanejo (Santander), Briceño (Boyacá) y Jamundí (Valle del Cauca). La presencia de impurezas minerales en el carbón disminuye su poder calorífico y aumenta su impacto ambiental, por tal razón es necesario implementar técnicas de beneficio que mejoren su calidad antes de su uso industrial. La flotación-espumante que está basada en las diferencias de hidrofobicidad entre las partículas de carbón y los minerales acompañantes, se propuso como una alternativa eficaz para la remoción de cenizas y la mejora de la eficiencia energética del carbón.

Se aplicó un diseño experimental factorial 3x2x2 para estudiar el efecto combinado del tipo de colector (*AERO MX 5160* y *Queroseno*) y su concentración baja y alta (*Low* y *High*), además se consideraron las características físico-químicas de cada muestra de carbón para ser evaluadas durante el proceso de beneficio. Para esto se empleó una metodología de flotación con acondicionamiento cero, siguiendo procedimientos estandarizados de laboratorio. Las variables de respuesta evaluadas fueron el rendimiento del proceso y la remoción de cenizas, determinadas mediante la norma *ASTM D-3174-04*.

Los resultados indicaron que el colector *AERO MX 5160* a alta concentración (≈ 470 g/t) presentó el mayor rendimiento ajustado del proceso, con un 65.33 % de recuperación, mientras que el *Queroseno* a baja concentración (≈ 270 g/t) logró la mayor remoción de cenizas, alcanzando un 50.69 %, lo cual evidencia un compromiso técnico entre recuperación másica y limpieza del concentrado, con una diferencia de 6.5 puntos porcentuales en recuperación a favor del *AERO MX 5160*, y de 3.2 puntos en remoción de cenizas a favor del *Queroseno*. La eficiencia del proceso también estuvo influenciada por las características físico-químicas de las muestras: el carbón de Briceño, con un bajo contenido de oxígeno (0.60 %) y menores proporciones de SiO_2 (25.77 %) y Al_2O_3 (6.59 %), mostró los mejores resultados, con una remoción máxima de cenizas del 82.87 % y una recuperación mayor al 56 %. Por el contrario, el carbón de Capitanejo, con un mayor grado de oxidación ($\text{O} = 6.81$ %) y un elevado contenido de materia mineral ($\text{SiO}_2 = 63.82$ %, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 28.67$ %), fue el menos beneficiado por el proceso, con remociones de ceniza inferiores al 25 %, a pesar de alcanzar recuperaciones por encima del 70 %.

En conclusión, la flotación-espumante demostró ser una técnica viable y efectiva para el beneficio de carbones colombianos de alto rango tipo antracita, siempre y cuando se realice una adecuada selección de colectores y se consideren las propiedades físico-químicas de cada muestra de carbón. Los hallazgos de este estudio aportan un conocimiento clave para optimizar el procesamiento de carbones nacionales con fines energéticos e industriales.

Palabras claves: Flotación espumante, colector, carbón de alto rango, características físico-químicas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	10
1. MARCO TEÓRICO.....	11
1.1 EL CARBÓN Y SU CLASIFICACIÓN	11
1.1.1 Antracita.....	11
1.1.2 Bituminoso.....	12
1.1.3 Sub-bituminoso.....	12
1.1.4 Lignito.....	12
1.2 IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DEL CARBÓN.....	14
1.3 MÉTODOS DE BENEFICIO DEL CARBÓN	14
1.3.1 Métodos físicos.....	15
1.3.2 Métodos químicos.....	16
1.3.3 Métodos biológicos.....	17
1.4 FLOTACIÓN.....	18
1.4.1 Agente colector	20
1.4.2 Agente espumante.....	21
1.5 ANTECEDENTES	22
2. OBJETIVOS.....	24
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	25
3.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	25
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	30
4.1 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS ORIGINALES	30
4.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES PRELIMINARES	34
4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	41
4.4 EFECTO DEL TIPO Y CONCENTRACIÓN DE COLECTOR	43

4.4.2 Efecto AERO MX 5160.....	44
4.4.3 Efecto Queroseno.....	45
4.4.4 Efecto de la concentración.	46
4.5 INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	47
4.5.1 Materia volátil, carbono fijo y rango.	47
4.5.2 Grado de oxidación.	48
4.5.3 Composición de la materia mineral.	49
CONCLUSIONES.....	55
RECOMENDACIONES	57
REFERENCIAS	58
ANEXOS.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de carbones (ASTM Standards, 2023).....	13
Tabla 2. Clasificación de colectores (Bulatovic, 2007).....	21
Tabla 3. Clasificación de espumantes (Bulatovic, 2007)	22
Tabla 4. Análisis próximo de las muestras de carbones originales	31
Tabla 5. Composición de las cenizas de las muestras de carbones originales.....	32
Tabla 6. Análisis último de las muestras de carbones originales	33
Tabla 7. Rango de los carbones según norma ASTM	34
Tabla 8. Condiciones experimentales	36
Tabla 9. ANOVA de remoción de cenizas	41
Tabla 10. ANOVA de rendimiento del proceso	42
Tabla 11. Medias de mínimos cuadrados de la interacción colector-concentración	43
Tabla 12. Tipos de minerales del carbón (Speight, 2013)	50

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de formación del carbón (González Dávila, 2020).....	11
Figura 2. Principio de flotación espumante en celda (Wills & Finch, 2016)	18
Figura 3. Variables del proceso de flotación (Polat, et al., 2003)	19
Figura 4. Trituración de los carbones	26
Figura 5. Celda de flotación	26
Figura 6. Flotado recolectado del proceso.....	27
Figura 7. Filtración al vacío del flotado	28
Figura 8. Secado de filtros.....	28
Figura 9. Pesaje de la torta seca	29
Figura 10. Mufla del laboratorio	29
Figura 11. Análisis de cenizas en mufla.....	29
Figura 12. Rendimiento de flotación.....	37
Figura 13. Cenizas en el carbón de Capitanejo	38
Figura 14. Cenizas en el carbón de Briceño	39
Figura 15. Cenizas en el carbón de Jamundí.....	39
Figura 16. Remoción de cenizas.....	40

INTRODUCCIÓN

El carbón de alto rango se caracteriza por su alto contenido de carbono fijo, bajo porcentaje de materia volátil, baja humedad y elevado poder calorífico. Estas propiedades lo convierten en un recurso estratégico para distintas aplicaciones industriales, como la generación de energía térmica, la producción de coque en la industria siderúrgica y su uso en la fabricación de goma sintética, colorantes y en sistemas de tratamiento de agua. Sin embargo, su aprovechamiento eficiente requiere de una adecuada preparación y beneficio, especialmente cuando presenta una elevada proporción de materia mineral que disminuye su rendimiento energético y aumenta los impactos ambientales asociados con su combustión.

La creciente demanda de carbones de alto rango por parte del sector industrial ha impulsado el desarrollo de métodos más eficaces para su procesamiento. En este contexto, la flotación-espumante se ha posicionado como una de las técnicas más prometedoras para la remoción selectiva de impurezas minerales, permitiendo mejorar la calidad del concentrado sin comprometer significativamente el rendimiento del proceso. Esta técnica se basa en la diferencia de hidrofobicidad entre las partículas de carbón y los minerales acompañantes, lo que permite una separación eficiente en medios acuosos con el uso de reactivos como colectores y espumantes. Su aplicación en carbones finos ha mostrado resultados significativos en términos de limpieza y recuperación, aunque su eficacia en carbones de alto rango aun presenta retos operacionales debido a su baja reactividad superficial y mayor susceptibilidad a la oxidación (Shahbazi & Chelgani, 2016).

En este trabajo se propone evaluar la viabilidad técnica del proceso de flotación-espumante para el beneficio de tres carbones colombianos de alto rango, provenientes de los municipios de Capitanejo, Briceño y Jamundí. Para esto, se estudiará el efecto del tipo y la concentración del colector sobre el rendimiento del proceso y la remoción de cenizas, y se realizará un análisis detallado de las características físico-químicas de cada muestra de carbón. El estudio se desarrollará bajo un enfoque experimental con diseño factorial, que permitirá identificar las condiciones óptimas para maximizar la recuperación del material carbonoso y mejorar su calidad energética e industrial.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 EL CARBÓN Y SU CLASIFICACIÓN

El carbón es una roca sedimentaria de origen orgánico que se forma a partir de la acumulación y transformación de grandes cantidades de materia vegetal bajo condiciones anaerobias. Durante su formación geológica, este material experimenta un proceso de transformación llamado carbonificación, que implica la compactación y el aumento gradual de la temperatura y la presión a lo largo del tiempo (**Figura 1**), lo cual genera una mayor concentración de carbono y una disminución del contenido de agua y sustancias volátiles (UPME, 2012).

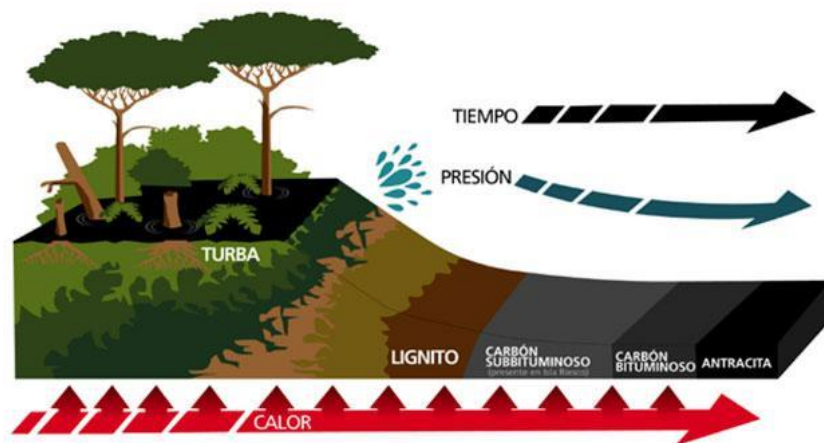


Figura 1. Proceso de formación del carbón (González Dávila, 2020)

El resultado de este proceso son distintos tipos de carbón, que varían en sus propiedades y composición. Químicamente, el carbón está constituido principalmente por carbono, acompañado por otros elementos como hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno (Speight, 2013). A estos se los puede clasificar como:

1.1.1 Antracita.

Es el carbón de mayor rango, se caracteriza por su dureza, densidad, textura cristalina, color negro lustroso y por poseer un alto porcentaje de carbono fijo y un bajo porcentaje de materia volátil. Su contenido de humedad cuando recién se hace la extracción es inferior al 15%, y su poder calorífico ronda entre 22 y 28 millones de BTU/tonelada en base húmeda y libre de materia mineral. Su combustión es más limpia y lenta, con poca generación de humo que lo hace ideal para la calefacción o vapor en la industria térmica y siderúrgica, también se utiliza

en la producción de goma sintética y colorantes y filtración de agua (Speight, 2005, 2013; UPME, 2012).

1.1.2 Bituminoso.

Es uno de los más abundantes y de mayor aplicación industrial. Es un carbón denso, generalmente negro, a menudo con bandas bien definidas de material brillante y opaco. Su contenido de humedad es inferior al 20% en peso, y su poder calorífico ronda entre 21 y 30 millones de BTU/tonelada en base húmeda y libre de materia mineral. Tiene propiedades aglomerantes, que lo hace adecuado para la producción de coque metalúrgico, se utiliza principalmente como combustible para generar calor y energía (Speight, 2005, 2013; UPME, 2012).

1.1.3 Sub-bituminoso.

Es un carbón que presenta un grado de carbonización mayor que el lignito, es de color marrón oscuro o gris-negro, más denso que el lignito y menor contenido de humedad que ronda entre el 20 y 30 % en peso, lo que mejora su eficiencia energética, su poder calorífico ronda entre 17 y 24 millones de BTU/tonelada en base húmeda y libre de materia mineral. Se utiliza como combustible para la generación de energía eléctrica a vapor y para procesos industriales en general (Speight, 2005, 2013; UPME, 2012).

1.1.4 Lignito.

Es el carbón de menor rango, es de color marrón y presenta una textura blanda. Tiene un alto contenido de materia volátil y su contenido de humedad es alto, llegando al 45%; su poder calorífico ronda entre 9 y 17 millones de BTU/tonelada en base húmeda y libre de materia mineral. Se utiliza como combustible para la generación de energía eléctrica a vapor, también para la creación de briquetas de lignito para quemarlas en hornos (Speight, 2005, 2013; UPME, 2012).

1.1.5 Clasificación según la norma ASTM.

El carbón se puede clasificar según la normativa más usada internacionalmente, la norma ASTM D-388 (ASTM Standards, 2023), que establece un sistema estandarizado de categorías y subcategorías, en función de sus propiedades físico-químicas, tales como el porcentaje de materia volátil y carbono fijo para carbones de alto rango, y el poder calorífico superior para carbones de menor rango; esta clasificación se presenta en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Clasificación de carbones (ASTM Standards, 2023)

<i>Categoría</i>	<i>Subcategoría</i>	<i>Materia Volátil (bslc), % p/p</i>	<i>Carbono Fijo (bslc), % p/p</i>	<i>Poder Calorífico Superior, MJ/kg</i>
Antracita	Meta-antracita	< 2	> 98	-
	Antracita	2 a 8	92 a 98	-
	Semi-antracita	8 a 14	86 a 92	-
Bituminoso	Bajo nivel volátil	14 a 22	78 a 86	-
	Medio nivel volátil	22 a 31	69 a 78	-
	Alto nivel volátil A	> 31	< 69	> 32.6
	Alto nivel volátil B	-	-	30.2 a 32.6
	Alto nivel volátil C	-	-	26.7 a 30.2
Sub-Bituminoso	Sub-Bituminoso A	-	-	24.4 a 26.7
	Sub-Bituminoso B	-	-	19.3 a 22.1
	Sub-Bituminoso C	-	-	22.1 a 24.4
Lignito	Lignito A	-	-	14.6 a 19.3
	Lignito B	-	-	< 14.6

1.2 IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DEL CARBÓN

El uso del carbón en todo tipo de procesos, en particular cuando contiene un alto porcentaje de impurezas minerales, generan altos impactos ambientales. Durante la combustión, las cenizas y compuestos inorgánicos en el carbón generan emisiones de material particulado, óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y metales pesados, que afectan la calidad del aire y contribuyen a fenómenos naturales como la lluvia ácida (Speight, 2013). Estas emisiones no solo deterioran los ecosistemas cercanos, sino que también tienen consecuencias sobre la salud humana.

En Colombia, se ha estimado que la industria del carbón es responsable del alrededor del 1.4% de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero; esta cifra no está asociada solo a la generación de dióxido de carbono (CO₂), sino también a las emisiones de metano presentes en carbones de bajo rango o sin beneficiar (Minenergía, 2021). A nivel técnico, cuanto mayor es el contenido de cenizas en el carbón, menor es su eficiencia térmica, por lo que requiere un mayor consumo de material y, por ende, una mayor generación de residuos y emisiones. Además, un alto contenido de impurezas no es adecuado para procesos siderúrgicos, ya que afectan la calidad del producto final.

Por lo tanto, la implementación de tecnologías de beneficio es crucial para mitigar estos efectos, al permitir la remoción selectiva de la materia mineral y reducir los impactos relacionados con su uso. Como señala la UPME (2012), una adecuada preparación del carbón no solo mejora su desempeño, sino que contribuye a disminuir el volumen de residuos generados durante su aprovechamiento.

1.3 MÉTODOS DE BENEFICIO DEL CARBÓN

Durante el siglo XX, el acelerado crecimiento en el uso del carbón como fuente primaria de energía impulsó el desarrollo de técnicas orientadas a su caracterización y beneficio. La necesidad de garantizar un aprovechamiento eficiente y ambiental de este recurso conllevó a la implementación de métodos cada vez más precisos para el análisis y la mejora de su calidad, ya que de esto dependía el correcto uso que se le podía dar al carbón de manera que no tenga consecuencias para el medio ambiente (Speight, 2005). En este contexto, los procesos de limpieza del carbón, también conocidos como procesos de beneficio, se han consolidado como una etapa fundamental en su preparación para usos industriales,

permitiendo reducir la proporción de materia mineral y formas de azufre que afectan su utilización tanto en la industria energética como en la siderúrgica.

Dependiendo del principio de separación que se emplee, estos métodos pueden clasificarse en físicos, químicos y biológicos. La selección de una técnica específica depende de varios factores, entre ellos, el tipo y grado del carbón, la distribución del tamaño de partícula, la naturaleza de las impurezas y los costos operativos y ambientales.

1.3.1 Métodos físicos.

Los métodos físicos son el grupo de técnicas más usados en la industria para el beneficio del carbón. Estos métodos aprovechan las propiedades físicas como la densidad, hidrofobicidad, la susceptibilidad magnética o la conductividad eléctrica, lo que permite separar la materia carbonosa de las impurezas sin alterar la estructura del carbón.

- Separación por gravedad. Se basa en la diferencia de densidad entre el carbón ($\sim 1.3 \text{ g/cm}^3$) y los minerales acompañantes como pirita, cuarzo o arcillas ($> 2.2 \text{ g/cm}^3$). Esta técnica es eficaz para partículas de tamaño medio a grueso y se emplean dispositivos como ciclones, mesas vibratorias y concentrados centrífugos. A pesar de su eficiencia comprobada en la remoción de gangas gruesas, su rendimiento disminuye cuando se realiza en minerales finamente diseminados o partículas menores a 0.5 mm (Meshram et al., 2015; Wang et al., 2018).
- Flotación espumante. Se fundamenta en las diferencias de afinidad superficial entre el carbón hidrofóbico y los minerales hidrofílicos, se usa para partículas finas de carbón. En este proceso, se adicionan colectores y espumantes que favorecen la adhesión selectiva de las partículas carbonosas a burbujas de aire, facilitando su separación en una celda o columna de flotación. La eficiencia del proceso está ligada con la naturaleza y dosificación de los reactivos (Meshram et al., 2015; Wang et al., 2018).
- Aglomeración con aceite. Esta técnica usa hidrocarburos ligeros como queroseno, diésel o aceites vegetales para inducir la formación de aglomerados de carbón, los cuales pueden separarse posteriormente por sedimentación o flotación. Es una alternativa viable en el caso de carbones ultrafinos o lodos, sin embargo, su implementación a nivel industrial es limitada debido a los costos y la dificultad de reciclar los agentes aglomerantes (Meshram et al., 2015; Wang et al., 2018).

- Separación magnética. Este método utiliza campos magnéticos intensos, especialmente en configuraciones de alto gradiente, para atraer las impurezas minerales que poseen propiedades magnéticas, como es el caso de la pirita y apartarlas del carbón. La literatura reporta eficiencias de remoción de azufre pirítico superiores al 80% en condiciones óptimas (Meshram et al., 2015; Wang et al., 2018).
- Separación electrostática. Se basa en las diferencias en la conductividad eléctrica entre el carbón, menos conductor, y los minerales, que presentan una mayor conductividad. El proceso puede realizarse mediante carga triboeléctrica o por ionización en presencia de campos eléctricos de alta tensión. Aunque presenta la ventaja de operar en seco, disminuyendo el uso de agua, su aplicación industrial es limitada debido a su complejidad y la necesidad de una clasificación granulométrica estricta (Meshram et al., 2015; Wang et al., 2018).

1.3.2 Métodos químicos.

Los métodos químicos están diseñados para eliminar impurezas que no pueden ser removidas eficazmente por medios físicos, especialmente aquellas que se encuentran químicamente ligadas a la matriz carbonosa. Debido a sus altos costos operativos y a la generación de residuos que deben ser tratados adecuadamente, estos métodos suelen restringirse a contextos experimentales o a la producción de materiales especiales.

- Lixiviación ácida. Se fundamenta en la capacidad de ciertos ácidos fuertes, como el ácido clorhídrico (HCl), nítrico (HNO₃), sulfúrico (H₂SO₄) y fluorhídrico (HF), para disolver compuestos presentes en minerales como la calcita, caolinita, anhidrita, hematita y otros silicatos. La selección del ácido depende de la naturaleza de las impurezas objetivo, mientras que el HCl y el H₂SO₄ son útiles en la eliminación de carbonatos y óxidos, el HF ha demostrado una alta efectividad en la disolución de materiales silicatados y aluminosilicatos, permitiendo reducciones en el contenido de cenizas. Sin embargo, el empleo de estos reactivos implica desafíos ambientales y de seguridad, a causa de la generación de efluentes ácidos y manipulación de sustancias altamente corrosivas (Meshram et al., 2015).
- Lixiviación alcalina. Es una alternativa o complemento a los tratamientos ácidos, se utiliza para disminuir impurezas como sílice, alúmina y formas específicas de azufre orgánico. Emplea soluciones de hidróxidos alcalinos como NaOH, KOH o Ca(OH)₂.

Este tratamiento también puede modificar la superficie del carbón, mejorando su reactividad o propiedades de adsorción. Aunque es menos agresiva que la lixiviación ácida, la eficiencia depende del tiempo de contacto, temperatura y concentración, por lo que estos factores deben ser controlados cuidadosamente para evitar la degradación de la matriz orgánica (Meshram et al., 2015).

- Lixiviación combinada. Al aplicar el tratamiento combinado, inicialmente una base, seguida de una etapa ácida, se logra una desmineralización profunda. Este enfoque permite disolver compuestos, que no serían removidos por un único reactivo, lo que optimiza la eficiencia global del proceso. De acuerdo con la literatura este método ha logrado disminuir el contenido de cenizas por debajo del 1%. Sin embargo, su complejidad operativa limita su uso al ámbito experimental y a procesos de obtención de materiales carbonosos de alta pureza (Meshram et al., 2015).

1.3.3 Métodos biológicos.

Los métodos biológicos constituyen una alternativa sostenible y de bajo impacto ambiental para la remoción de azufre del carbón. Se fundamentan en la capacidad de ciertos microorganismos de oxidar compuestos azufrados. Aunque tiene bajo requerimiento energético y alta selectividad hacia formas específicas de azufre, la lentitud de los procesos y la sensibilidad a condiciones ambientales impiden su implementación a gran escala.

- Biodesulfuración: Se emplean bacterias del género *Acidithiobacillus*, en particular *A. ferrooxidans*, reconocida por su capacidad para oxidar azufre pirítico a sulfatos solubles. Esta transformación no requiere reactivos tóxicos ni genera residuos peligrosos. No obstante, su viabilidad a nivel industrial se ve limitada por la lenta oxidación bacteriana, la necesidad de condiciones de cultivo muy controladas y el prolongado tiempo de residencia requerido (Meshram et al., 2015). Sin embargo, su estudio continuo representa un punto de partida prometedor para el desarrollo de tecnologías biológicas más eficientes, selectivas y escalables en el futuro.

1.4 FLOTACIÓN

Como se menciona en apartados anteriores, la presencia de materia mineral en el carbón no solo disminuye su eficiencia energética al reducir el poder calorífico del material, también afecta negativamente su calidad, haciéndolo menos óptimo para aplicaciones en la industria siderúrgica. Además, agrava su impacto ambiental, al generar mayores emisiones de partículas, gases contaminantes y residuos sólidos. En este contexto, la flotación espumante surge como una técnica eficaz para reducir el contenido de cenizas, al permitir la separación selectiva de la fracción mineral del carbón.

Este es un proceso donde se aprovecha la diferencia en el comportamiento hidrofílico e hidrofóbico de las partículas orgánicas e inorgánicas, lo que permite una separación efectiva de ambas sustancias. En el caso del carbón, esta propiedad se aprovecha debido a la naturaleza hidrofílica de su materia mineral. Al introducir burbujas de aire en una suspensión acuosa del carbón previamente tratado con reactivos, las partículas finas de carbón que tienen un comportamiento hidrofóbico se adhieren a burbujas de aire y se arrastran a la superficie, formando una espuma que puede ser retirada como concentrado (Wills & Finch, 2016). En la **Figura 2**, se observa el esquema de una celda de flotación y el principal mecanismo de interacción entre partículas y burbujas.

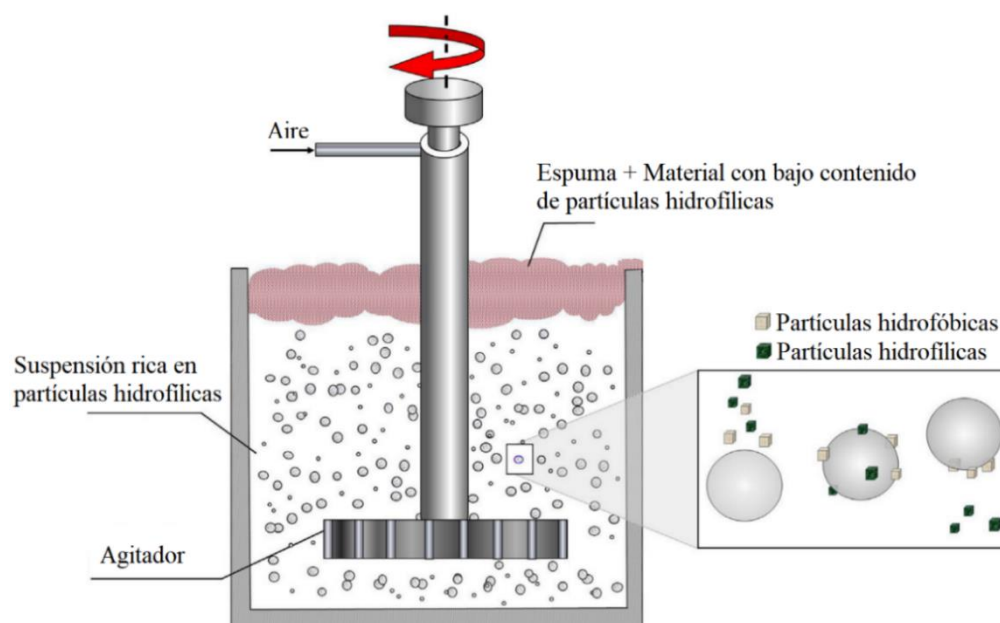


Figura 2. Principio de flotación espumante en celda (Wills & Finch, 2016)

Desde un punto de vista termodinámico, el éxito está relacionado con la formación de una interfase estable entre la burbuja y la partícula. Para esto, es necesario que el ángulo de contacto entre ambos sea lo suficientemente alto, indicando una superficie adecuadamente hidrofóbica. Según Polat et al. (2003), este comportamiento se ve influido por varios factores como el grado de oxidación del carbón, la presencia de grupos funcionales superficiales, el tipo de colector utilizado, y los parámetros que se pueden observar en la **Figura 3**.

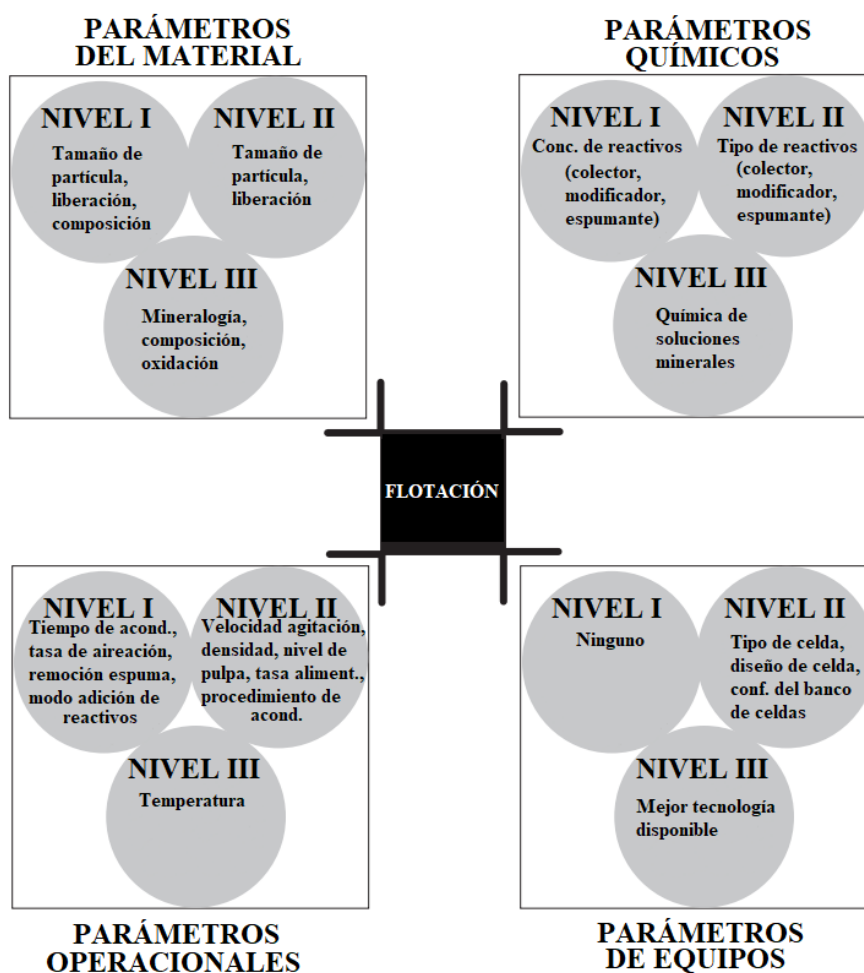


Figura 3. Variables del proceso de flotación (Polat, et al., 2003)

El proceso de flotación se sustenta en la interacción entre partículas y burbujas, este fenómeno se puede describir en tres mecanismos principales:

- Adhesión selectiva a las burbujas de aire (flotación verdadera). Es el mecanismo que representa el principio ideal de flotación. Ocurre cuando una partícula hidrofóbica se adhiere directamente a una burbuja de aire debido a una afinidad, ya sea natural o inducida por reactivos. La partícula, al tener una superficie que repele el agua, forma un

contacto estable con la burbuja y asciende junto a ella hasta la superficie, en la **Figura 2** se ilustra el principio de la flotación verdadera. Este proceso es favorecido por un ángulo de contacto alto, una película líquida delgada y estable, y una baja energía de adhesión entre la burbuja y el sólido (Polat, et al., 2003; Wills & Finch, 2016).

- Arrastre hidráulico (entrainment). En este caso, las partículas no se adhieren a las burbujas por hidrofobicidad, sino que son transportadas mecánicamente hacia la espuma por el flujo del líquido. Ocurre especialmente con partículas muy finas que quedan suspendidas en el agua y ascienden junto con las burbujas. El entrainment suele resultar en una pérdida de selectividad, ya que arrastra material no deseado al concentrado (Bulatovic, 2007; Wills & Finch, 2016).
- Atrapamiento físico (agregación). Este mecanismo se produce cuando las partículas quedan atrapadas entre burbujas o entre otras partículas ya adheridas, sin que exista una afinidad superficial. Aunque contribuye a la recuperación, suele ser una fuente de impurezas en el concentrado final, sobre todo si se generan espumas gruesas o inestables (Bulatovic, 2007).

Para mejorar la eficiencia de la flotación, se incorporan agentes externos inertes. Estos agentes aumentan selectivamente la adhesión de partículas hidrofóbicas, facilitan la formación de espuma y estabilizan las condiciones de operación.

1.4.1 Agente colector

Son compuestos orgánicos con propiedades hidrofóbicas, inducen selectivamente hidrofobicidad en la suspensión a tratar. Se componen mayormente de grupos polares y no polares, con la capacidad de unirse al sólido a través de su parte polar, generalmente por medio de un grupo iónico conocido como solidofílico. Este enlace ocurre en la superficie del mineral, ya sea por quimisorción o enlace químico (Navarro, 2011). Este reactivo busca mejorar la interacción entre partículas orgánicas y burbujas de aire, formando una fina capa que reemplaza el recubrimiento de agua en la partícula a flotar. Este proceso resulta en un aumento significativo de la hidrofobicidad en el sólido (Guerrero, 2012).

Además, la elección del colector depende de las características superficiales del material a tratar. En el caso del carbón, especialmente si presenta superficies parcialmente oxidadas Polat et al. (2003) recomiendan el uso de colectores con estructuras balanceadas entre

polaridad y cadena hidrocarbonada para inducir una hidrofobicidad eficaz. Por otra parte, la eficiencia del colector también depende de su capacidad de difusión, adsorción y su comportamiento en distintas condiciones de pH (Wills & Finch, 2016).

Bulatovic (2007) clasifica los colectores con base a su naturaleza química e interacción iónica, como se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Clasificación de colectores (Bulatovic, 2007)

Tipo	Subtipo	Ejemplos
No iónico	-	Queroseno, aceite de pino, aceites de petróleo
Iónico	Aniónico	Xantato, ditiofosfato, ditiocarbamato, carbóxilo, sulfonato
	Catiónico	Amina, éter amina

1.4.2 Agente espumante

Los espumantes son esenciales para una flotación eficaz, facilitando la unión entre partículas hidrofóbicas y burbujas de aire. Aunque las partículas pueden inicialmente unirse a las burbujas en un sistema agitado, estas burbujas son inestables y pueden romperse, además de que su tamaño puede no ser óptimo. Por lo tanto, se requiere la adición de espumantes para promover la formación de burbujas estables (Navarro, 2011).

Estos reactivos tienen como función principal controlar el tamaño y la estabilidad de las burbujas de aire dentro de la celda de flotación. Una espuma formada correctamente facilita el ascenso del agregado burbuja-partícula hacia la superficie. La eficiencia del espumante depende de su capacidad para reducir la tensión superficial del líquido, formar una película elástica en la interfaz aire-líquido y resistir la unión de burbujas bajo la agitación.

Bulatovic (2007) clasifica a los espumantes según su comportamiento a diferentes valores de pH, como se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Clasificación de espumantes (Bulatovic, 2007)

Ácidos	Neutros	Básicos
Fenoles	Alcoholes alifáticos	Base de piridina
Sulfatos de alquilo	Alcoholes cíclicos	
	Parafinas alcoxi	
	Éteres de polipropilenglicol	
	Éteres de poliglicol	
	Éteres de poliglicerol	

1.5 ANTECEDENTES

Aunque se han realizado numerosos estudios sobre procesos de flotación en diferentes contextos, la literatura actual carece de investigaciones detalladas sobre la aplicación de la flotación en celda, en carbón de alto rango teniendo en cuenta el contexto de las condiciones y características específicas del Carbón Colombiano.

Sin embargo, de los estudios existentes, resalta la investigación de Kadagala, Nikkam y Tripathy (2021), quienes realizaron una revisión sobre sistemas de reactivos mixtos aplicados en la flotación de carbón, revelando que la combinación de colectores, especialmente en carbones de medio y bajo rango, permite modificar el ángulo de contacto y aumentar la hidrofobicidad de las partículas, mejorando la eficiencia del proceso.

Además, una investigación significativa de Guerrero (2015), que se centró en la cinética de flotación de lodos finos de carbón. Este estudio, aunque no específicamente aplicado al carbón de alto rango, dio resultados sobre la importancia del agente colector y espumante en el proceso de flotación. En particular, los resultados más prometedores se obtuvieron al emplear queroseno como agente colector y el espumante Aerofroth 65. Adicionalmente, una investigación más, llevada a cabo por Guerrero (2017), destaca la relevancia de la concentración del agente colector en el proceso de flotación. En este contexto, se evidencia que dosis elevadas de dicho agente pueden resultar en la recuperación de cantidades significativas de material no deseado, comprometiendo así la selectividad del proceso.

Así mismo, Kumar et al (2021) analizaron el desempeño de la flotación en carbones residuales de plantas de lavado. Utilizando un diseño factorial completo, demostraron que

tanto la dosis del colector como del espumante influye de significativamente en la recuperación de carbón y en el contenido de cenizas.

Por su parte, Liu et al. (2022) profundizan en el papel que tienen los grupos funcionales hidrofóbicos e hidrofílicos presentes en los colectores. A través de pruebas usando distintos tamaños de partículas, demostraron que la presencia de grupos hidrofóbicos en la estructura del colector mejora la adsorción sobre superficies oxidadas.

Xia, Ren y Peng (2015) llevaron a cabo un estudio sobre el acondicionamiento en el proceso de flotación, utilizando carbón antracita oxidado. Sus investigaciones revelaron que al emplear un nuevo proceso de flotación al que denominaron acondicionamiento cero, se obtuvieron mejores resultados en el beneficio del carbón en comparación con las pruebas realizadas utilizando el procedimiento tradicional. Los autores explican, que este comportamiento se debe a la formación de burbujas más hidrofóbicas recubiertas por el colector y a la menor formación de capas de hidratación en las partículas, lo que facilita la adhesión a las burbujas, mejorando la selectividad y eficiencia del proceso.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la viabilidad del proceso de flotación-espumante para el beneficio de tres carbones colombianos de alto rango.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar el efecto del tipo y concentración de colector sobre la reducción de materia mineral de carbones de alto rango mediante flotación-espumante.
2. Establecer la influencia de las características físico-químicas de los carbones de alto rango sobre la eficiencia del proceso de flotación-espumante.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se llevó a cabo un estudio experimental, utilizando un diseño factorial $3 \times 2 \times 2$ para evaluar el efecto del tipo de carbón, así como el tipo y la concentración de colector, en el rendimiento y la remoción de materia mineral en carbones de alto rango. Para ello se trabajó con muestras de carbón provenientes de tres yacimientos colombianos y se analizaron dos niveles para el tipo y la concentración del colector, con réplica para cada combinación experimental. La significancia de los efectos y sus interacciones sobre las variables de respuesta se determinó mediante ANOVA.

El desarrollo del estudio consta de cuatro etapas. En la primera etapa, se llevaron a cabo pruebas preliminares para determinar las concentraciones más adecuadas de los 2 colectores seleccionados. Estas pruebas ayudaron a establecer las condiciones iniciales para las siguientes etapas del experimento.

Una vez establecidas las concentraciones adecuadas, se procedió a la segunda etapa, en donde se realizaron todas las pruebas con una réplica para garantizar la reproducibilidad de los resultados. A medida que se realizaron las pruebas, se determinó la remoción de materia mineral en el carbón por medio de un análisis de cenizas.

La tercera etapa implicó determinar la influencia del colector y su concentración en el proceso de flotación-espumante del carbón. Esto ayudó a identificar la eficacia de cada colector y su impacto en la calidad del carbón obtenido. Y en la cuarta etapa, se analizó la influencia de las características físico-químicas del carbón en el proceso de flotación-espumante.

3.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental consistió en la flotación de acondicionamiento cero, propuesto por Xia, Ren y Peng (2015); en este método, se utilizó carbón antracita oxidado. Los resultados indicaron que tanto la recuperación de materia volátil como el contenido de cenizas concentradas mejoraron en comparación con el método tradicional. Las condiciones específicas del procedimiento (concentraciones, reactivos y demás datos) fueron seleccionadas a partir de las pruebas preliminares propias y se presentan en la *sección 4.2* de los resultados. A continuación, se describe con detalle el procedimiento general.

Preparación de la muestra: Las muestras de carbón se trituraron y tamizaron para obtener un tamaño de partícula uniforme de 75 micras por pasante malla 200 (**Figura 4**).

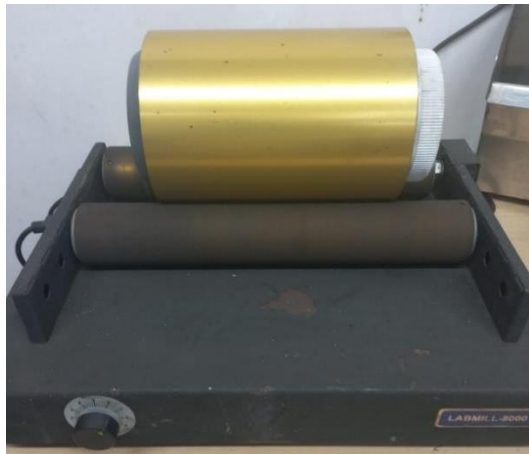


Figura 4. Trituración de los carbones

Ajuste del equipo: Se ajustaron los parámetros del equipo de flotación, es decir la velocidad de agitación (900 rpm) y la cantidad de aire; para todos los experimentos se dejó la llave permitiendo el paso del aire a apertura máxima (1.03 cm/s) (**Figura 5**).



Figura 5. Celda de flotación

Adición de agua: Se añadió agua (1000 mL) a la celda de flotación para crear una suspensión homogénea de la muestra de carbón.

Adición de los agentes: Se agregó la cantidad requerida de colector a la celda por medio de una jeringa en microlitros, a su vez se incorporó la cantidad de espumante de forma similar. Luego se permitió una correcta homogeneización de la mezcla durante un minuto.

Adición de la muestra de carbón: Tras añadir el colector y espumante, y luego de permitir una correcta homogeneización, se añadió la cantidad requerida de la muestra de carbón.

Flotación de la muestra: Inmediatamente adicionada la muestra se abrió la llave que permitió el paso de aire. Con ayuda de una paleta, se extrajo la espuma que se generó en la celda y se depositó en un recipiente para su posterior filtrado (**Figura 6**). A lo largo de este tiempo se adicionaron pequeñas cantidades de agua para lavar las paredes de la celda. La recolección se hizo hasta que ya no se generó espuma, luego se procedió a apagar el motor del agitador. La celda se lavó muy bien para eliminar impurezas que pudieran alterar pruebas futuras.



Figura 6. Flotado recolectado del proceso

Filtrado de los productos de flotación: Los flotados se filtraron para eliminar la mayor cantidad de agua posible. Para ello se utilizó un sistema de filtración al vacío (**Figura 7**).



Figura 7. Filtración al vacío del flotado

Secado del filtrado: Las tortas obtenidas se secaron en un horno de secado a una temperatura de 107 °C durante dos horas (**Figura 8**), luego se pesaron (**Figura 9**) y se guardaron en recipientes para el consecutivo análisis de cenizas.



Figura 8. Secado de filtros



Figura 9. Pesaje de la torta seca

Determinación de cenizas: Finalmente, a los flotados se les realizó un análisis de cenizas siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D-3174-04 (**Figura 10 y 11**).



Figura 10. Mufla del laboratorio



Figura 11. Análisis de cenizas en mufla

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se presentan y analizan los resultados que se obtuvieron a partir de las pruebas experimentales sobre el proceso de flotación-espumante para el beneficio de tres tipos de carbones colombianos de alto rango.

Las pruebas se enfocaron en evaluar el efecto del tipo y concentración del colector sobre la reducción de la materia mineral, y así mismo, establecer la influencia de las características físico-químicas de los carbones de alto rango sobre la eficiencia del proceso.

Los datos experimentales se organizaron en función de las variables estudiadas y se presentan en tablas consignadas en los anexos de este documento, y en gráficos que posteriormente se analizarán en esta sección, en donde se podrán visualizar las tendencias y correlaciones.

Posteriormente, se discute la interpretación de los resultados obtenidos en comparación con estudios previos y se identifican las posibles limitaciones del procedimiento experimental.

Las muestras de los carbones originales fueron suministradas y rotuladas por el Servicio Geológico Colombiano, siendo de tres tipos: Carbón *A* de Capitanejo - Santander, Carbón *C* de Briceño - Boyacá y Carbón *E* de Jamundí - Valle del Cauca, al igual que uno de los tipos de colector (*AERO MX 5160*).

Por parte del grupo de investigación de Ciencia y Tecnología del Carbono, fue suministrado el otro tipo de colector (*Queroseno*), el espumante utilizado (*ARKOPAL*), y las facilidades del laboratorio con los equipos y materiales necesarios para las pruebas experimentales para el desarrollo de esta investigación.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS ORIGINALES

El análisis próximo de la **Tabla 4**, la composición de cenizas en la **Tabla 5** y el análisis último de la **Tabla 6** de las tres muestras de carbón originales fueron suministrados por el grupo de investigación de Ciencia y Tecnología del Carbono, para su posterior análisis.

Tabla 4. Análisis próximo de las muestras de carbones originales

Localización Geográfica	Porcentaje, % p/p (bs*)		
	Materia volátil	Cenizas	Carbono fijo
Capitanejo - Santander	10.47	8.88	80.64
Briceño - Boyacá	7.37	25.08	67.55
Jamundí - Valle del Cauca	12.14	18.48	69.38

*bs: base seca

Con base en los resultados del análisis próximo que se presentan en la **Tabla 4**, se observa una notable variabilidad en la composición de las muestras de carbón. La muestra de Briceño presenta el contenido más elevado de cenizas (25.08%), lo que indica una alta proporción de materia mineral asociada y, la necesidad de una limpieza eficiente, especialmente si se considera que su contenido de carbono fijo (67.55%) es el más bajo, lo que podría limitar su uso en algunos procesos industriales como los siderúrgicos.

En contraste, el carbón de Capitanejo presenta el mayor contenido de carbono fijo (80.64%) y el menor de cenizas (8.88%), perfilándose como el de mayor grado de carbonización haciéndolo óptimo para diversos usos industriales. Entre estos se destacan su aplicación en procesos térmicos, energéticos y siderúrgicos, donde se requiere un material de alta eficiencia de combustión y bajo contenido de impurezas. Estas observaciones permiten establecer una conexión con la clasificación de los carbones, que se aborda en la **Tabla 7**, donde los parámetros de carbono fijo y materia volátil se emplean como criterios para determinar el grado de carbonización de los carbones.

Tabla 5. Composición de las cenizas de las muestras de carbones originales

Localización Geográfica	Porcentaje, % p/p			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
Capitanejo - Santander	63.82	28.67	1.61	1.23
Briceño - Boyacá	25.77	6.59	29.07	0.42
Jamundí - Valle del Cauca	38.12	21.43	7.04	10.19

Del análisis de la composición química de las cenizas (**Tabla 5**), se observa una marcada diferencia en la naturaleza de las impurezas minerales entre las muestras de carbón. El carbón de Capitanejo presenta un predominio de óxidos de silicio (SiO₂: 63.82%) y aluminio (Al₂O₃: 28.67%), lo que indica una matriz mineral rica en silicatos y aluminosilicatos, usualmente caolinita y cuarzo. Esta composición es típica de las impurezas minerales asociadas de forma libre o discreta, lo que suele facilitar su eliminación mediante flotación (Wang & Peng, 2013). En contraste, el carbón de Briceño muestra un contenido elevado de Fe₂O₃ (29.07%), lo cual sugiere la presencia de pirita oxidada o de minerales férricos que tienden a estar más finamente diseminados y fuertemente asociados a la materia orgánica, dificultando su separación por métodos convencionales de flotación (Ma, et al., 2022).

Por otro lado, el carbón de Jamundí exhibe el mayor contenido de CaO (10.19%), lo que puede asociarse a la presencia de calcita o dolomita, minerales que generalmente provienen de ambientes sedimentarios carbonatados y que pueden afectar el pH del medio de flotación, alterando la acción de los reactivos colectores y espumantes (Luo, et al., 2016). Estos resultados no solo permiten diferenciar el origen geológico de los carbones, sino también anticipar la complejidad del proceso de concentración para cada muestra. El conocimiento de la composición de cenizas resulta clave para el diseño de estrategias de acondicionamiento químico y la selección de reactivos específicos en la flotación, buscando maximizar la remoción de cenizas y mejorar el rendimiento del proceso.

Tabla 6. Análisis último de las muestras de carbones originales

Localización Geográfica	Porcentaje, % p/p				
	C	H	N	S	O*
Capitanejo - Santander	78.45	3.15	1.48	0.69	6.81
Briceño - Boyacá	64.75	0.88	0.61	4.15	0.60
Jamundí - Valle del Cauca	72.70	3.16	1.42	1.07	2.08

(*) O calculado por diferencia

Del análisis último (**Tabla 6**), destaca el alto contenido de carbono (C) en el carbón de Capitanejo (78.45%), lo que indica una alta pureza orgánica y, por tanto, una mayor hidrofobicidad natural, favorable para la recuperación por flotación (Zhou et al., 2019). Por el contrario, el bajo contenido de carbono y el elevado contenido de azufre (S) en el carbón de Briceño (64.75% y 4.15%, respectivamente) sugieren una mayor proporción de materia mineral sulfurada, posiblemente asociada a pirita, cuya presencia puede interferir con los colectores convencionales y requerir un acondicionamiento específico (Luo, et al., 2016). Los contenidos de hidrógeno y oxígeno, que influyen en la relación H/C y O/C, también reflejan diferencias en el grado de carbonización entre las muestras, lo cual puede afectar la selectividad del proceso de flotación (Markič, et al., 2007).

Así mismo, la clasificación de las muestras originales fue realizada por el grupo de investigación de Ciencia y Tecnología del Carbono, siguiendo los rangos definidos por la norma ASTM, como se reporta en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Rango de los carbones según norma ASTM

Localización Geográfica	Porcentaje p/p		Rango de Carbón
	Materia Volátil, (bsfc) %	Carbono Fijo, (bsfc) %	
Capitanejo - Santander	11.49	88.51	Semi-antracita
Briceño - Boyacá	9.83	90.17	Semi-antracita
Jamundí - Valle del Cauca	14.89	85.11	Bituminoso Bajo nivel volátil

De la **Tabla 7** se puede observar la clasificación de los tres tipos de carbones utilizados, teniendo los dos primeros, Capitanejo y Briceño, de rango alto como Semi-antracitas, que se caracterizan por su alto contenido de carbono fijo y bajo contenido de materia volátil; y Jamundí como Bituminoso de Bajo nivel volátil, aunque se caracteriza por tener un alto contenido de carbono fijo, su materia volátil es moderadamente alta.

Con estas diferencias en la composición y rango de los tres carbones utilizados se puede anticipar diversos comportamientos en la flotación, en lo que respecta a la recuperación y rendimiento del proceso; este aspecto será analizado en la *sección 4.5.1*.

4.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES PRELIMINARES

Para analizar la influencia del tipo y la concentración del colector en la flotación-espumante, se desarrolló la primera etapa que fueron las pruebas experimentales preliminares, inicialmente se evaluaron tres concentraciones de pulpa, tomando 1.5, 3 y 5 % de *sólidos en la pulpa*, con base en lo encontrado por Barraza, Guerrero & Piñeres (2013); luego se realizaron las pruebas correspondientes y se utilizó un valor óptimo de 3% de *sólidos en pulpa* como referencia, debido a que el suministro de los carbones era limitado y el proceso de recolección requería un tiempo considerable; también se estableció la cantidad de 1000 mL de *agua* requerida para el proceso, esta cantidad fue establecida acorde con la capacidad de la celda utilizada y fue tomada directamente de la llave, ya que para este procedimiento se sugiere agua salina no desionizada (Bai, et al., 2020).

Con estas variables ya establecidas, se evaluó el espumante utilizado: *ARKOPAL N-060*, que es un tensioactivo de carácter no iónico, perteneciente a la familia de los nonifenol poliglicol éteres (**Tabla 3**), específicamente compuesto por nonifenol etoxilado con 6 unidades de óxido de etileno (6 mol EO). El número 060 en su nombre, hace referencia a su grado de etoxilación (06) y a su concentración del ingrediente activo que está en su 100%. Debido a su estructura química, posee un equilibrio hidrofóbico e hidrofílico y una capacidad significativa de reducción de la tensión superficial del agua.

En el contexto de la flotación, el *ARKOPAL N-060* resulta favorable y útil como espumante, debido a su gran capacidad de generar una espuma estable y uniforme de manera controlada, lo que mejora el transporte de partículas hidrofóbicas del carbón, la eficiencia y selectividad de todo el proceso. Además, su compatibilidad con cualquier tipo de reactivo aniónico, catiónico y no iónico, lo convierte en un tensioactivo muy versátil para sistemas complejos y, asimismo, es resistente con cualquier condición que afecte la calidad del agua, sea dura o contenga sales (Clariant, 2020).

Para el *ARKOPAL* se evaluaron cuatro concentraciones: 1060, 1766.67, 2473.33 y 3280.95 g/t. Se observó que a medida que aumentaba la dosis del espumante, se generaba una mayor cantidad de espuma, esto se asocia con un aumento en la densidad de la fase espumosa, lo cual favorece la recuperación de partículas finas por entrainment, arrastrando tanto fracción orgánica como mineral (Kumar et al., 2021). Si bien este comportamiento puede mejorar el rendimiento global de recuperación, también reduce la selectividad del proceso, lo cual no es deseable cuando se busca minimizar el contenido de cenizas. Por esta razón, se seleccionó una concentración intermedia de 1060 g/t, en la que se obtuvo una cantidad de espuma adecuada y un equilibrio aceptable entre recuperación y calidad del concentrado. Durante las pruebas, la celda de flotación se operó con el *flujo máximo de aire*, manteniendo la válvula completamente abierta, y se mantuvo la *velocidad de agitación* constante a 900 rpm.

Después de establecer las anteriores variables constantes, se procedió a evaluar los dos tipos de colectores suministrados: *AERO MX 5160* y *Queroseno*, para los tres tipos de carbón y para los cuales se estableció un rango de concentraciones para cada uno, tomando valores muy cercanos a los reportados en la literatura: 277, 454 y 907 g/t (Guerrero, 2012). Posteriormente a las pruebas de flotación se les realizó su respectivo análisis de ceniza según las normas *ASTM D-3174-04* (ASTM Standards, 2010). En las pruebas se pudo observar una tendencia general: a medida que la concentración de los colectores aumentaba, mejoraba el

rendimiento del proceso, pero también aumentaba el porcentaje de cenizas, lo cual no favorecía el beneficio del carbón. Por tal motivo, se escogieron dos concentraciones para cada colector, con el objetivo de encontrar un equilibrio que permitiera obtener valores aceptables tanto para el rendimiento del proceso como para el porcentaje de cenizas; a estas dos concentraciones se las llamó *Low* y *High*, haciendo referencia a un valor bajo y alto de concentración. Los resultados de estas pruebas preliminares se pueden observar en la *sección A* de los *Anexos* en la *Tabla A-2*.

Finalmente, con lo anterior se establecieron las condiciones experimentales óptimas para el proceso de flotación, las cuales se pueden observar en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Condiciones experimentales

Parámetro	Valor
Velocidad de agitación	900 rpm
Sólidos en pulpa	3%
Concentración de espumante	1060 g/ton
Nivel bajo colector	266.67 – 293.33 g/ton
Nivel alto colector	453.33 – 476.67 g/ton

Posteriormente se realizó la segunda etapa con las condiciones establecidas en la **Tabla 8**, en donde se realizaron todas las pruebas finales, incluyendo una réplica que permitió garantizar la reproducibilidad de los resultados obtenidos. Así mismo, se realizó su respectivo análisis de ceniza y los resultados obtenidos se pueden observar en la *sección B* de los *Anexos*.

En la **Figura 12** se presenta los rendimientos obtenidos para los tres tipos de carbón, en donde se consideraron los niveles *Low* y *High* de concentración de colector, y los dos tipos disponibles de este. El rendimiento másico se determinó con la Ec. (1):

$$\% \text{ Rendimiento másico (bs)} = \left(\frac{m_c}{m_a} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde m_c es la masa del concentrado en base seca y m_a es la masa de alimentación en base seca.

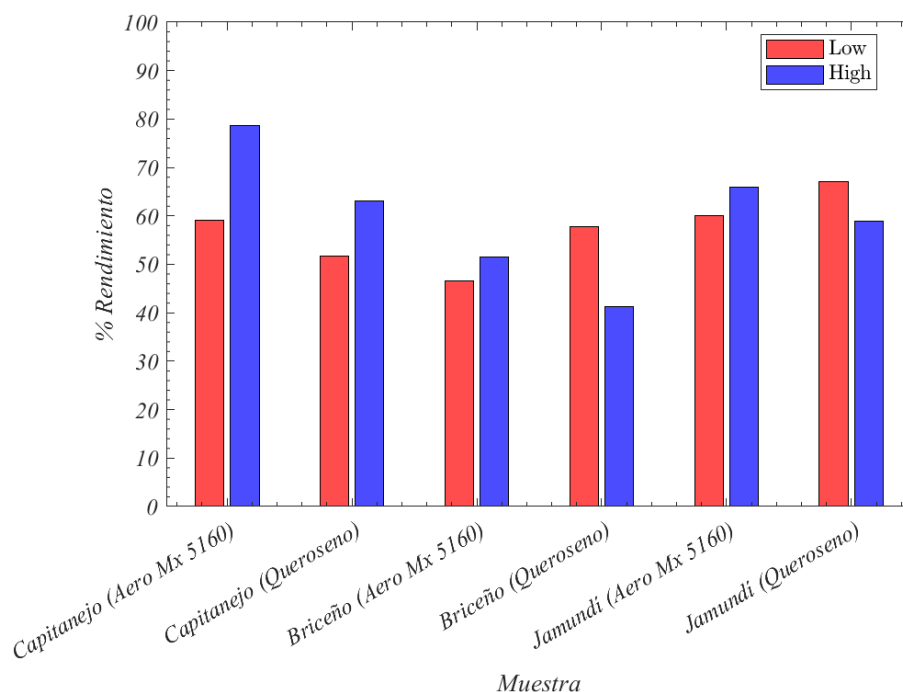


Figura 12. Rendimiento de flotación

La **Figura 12** muestra que, en general, las condiciones *High* mejoran el rendimiento del proceso de flotación, especialmente al utilizar el colector *AERO MX 5160*, el cual mostró un desempeño superior frente al *Queroseno* en la mayoría de las muestras. Este comportamiento sugiere una mayor afinidad del *AERO MX 5160* por las superficies carbonosas, favoreciendo la recuperación. No obstante, se observan diferencias asociadas a la naturaleza del carbón: en Briceño, el mejor rendimiento se obtuvo con *Queroseno* en condición *Low*, lo cual podría relacionarse con la alta presencia de piritita y la necesidad de condiciones menos agresivas para evitar el arrastre de cenizas. En cambio, en Capitanejo y Jamundí se alcanzaron mayores rendimientos con *AERO MX 5160*, lo que coincide con su mayor contenido de carbono fijo e hidrofobicidad natural.

En el caso de Jamundí, aunque *AERO MX 5160-High* (476.67 g t^{-1}) alcanzó una recuperación de 65.85 % con 47.27 % de remoción de cenizas, el *Queroseno-Low* (266.67 g t^{-1}) elevó tanto la recuperación hasta 67.02 %, como la remoción hasta 54.22 %. Este comportamiento indica que el carbón de esta zona posee hidrofobicidad natural suficiente para obtener altas recuperaciones aun con un colector no polar de menor selectividad. Tal respuesta se relaciona con su moderado contenido de óxidos sílico-aluminosos (SiO_2 38.12 %, Al_2O_3 21.43 %) y un nivel intermedio de oxidación (O 2.08 %), factores que reducen la demanda de colectores aniónicos de alta reactividad.

En la **Figura 13, 14 y 15**, se presenta el porcentaje de cenizas considerando los dos tipos de colector, y los niveles *Low* y *High* de concentración de colector, para los tres carbones respectivamente, incluyendo la ceniza del carbón original; en la **Figura 16**, se presenta el porcentaje de remoción de cenizas obtenido para los tres tipos de carbón, en donde se considera los niveles *Low* y *High* de concentración de colector, y los dos tipos disponibles de este. La remoción de cenizas se calculó con la Ec. (2):

$$\% \text{ Remoción de cenizas (bs)} = \left(\frac{A_i - A_f}{A_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde A_i es el porcentaje de cenizas inicial del carbón, antes de la flotación en base seca, y A_f es el porcentaje de cenizas final del concentrado, después de la flotación en base seca.

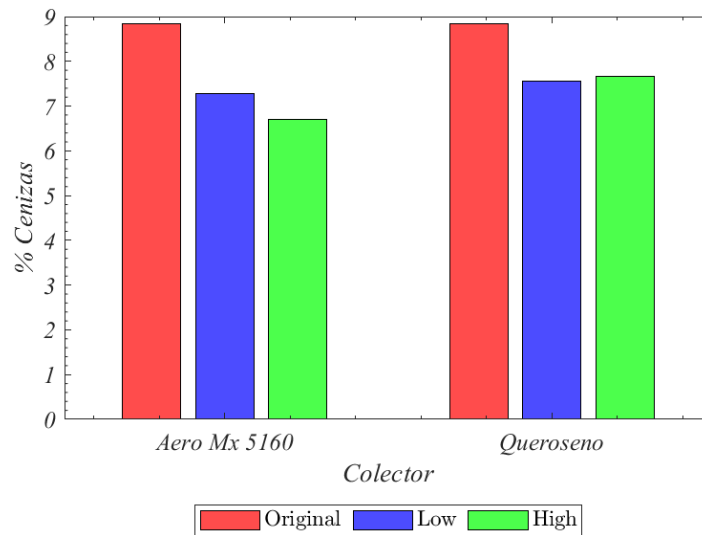


Figura 13. Cenizas en el carbón de Capitanejo

Como se indica en la **Figura 13**, el porcentaje de cenizas para el carbón de Capitanejo es relativamente alto respecto a la muestra original para ambos colectores (*AERO MX 5160* y *Queroseno*), pero se puede observar que para los niveles *Low* y *High*, este porcentaje disminuye. Con ambos colectores, el nivel *Low* reduce las cenizas aproximadamente a 7.3 y 7.6% respectivamente, mientras que con el nivel *High* se obtienen para el *AERO MX 5160* valores más bajos y eficientes, aproximadamente del 6.7%. Este comportamiento puede indicar que una mayor concentración de colector mejora la hidrofobicidad de las partículas del carbón, facilitando así su recuperación y reduciendo el arrastre de cenizas.

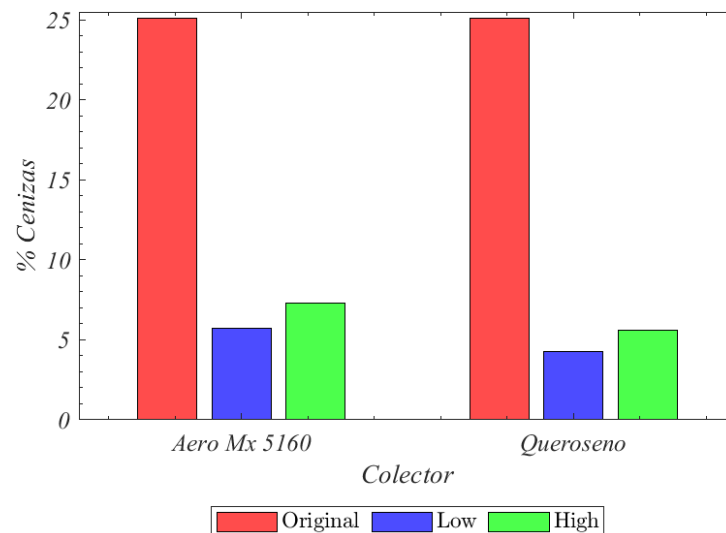


Figura 14. Cenizas en el carbón de Briceño

De acuerdo con la **Figura 14**, el carbón de Briceño presenta un porcentaje muy alto de cenizas en su condición original, lo que evidencia una gran presencia de materia mineral no deseada. Sin embargo, para los dos colectores (*AERO MX 5160* y *Queroseno*) con el nivel *Low*, se logra una notable disminución del porcentaje de cenizas, mientras que con el nivel *High*, el porcentaje de cenizas aumenta ligeramente, lo que sugiere que un exceso de colector puede promover la recuperación de partículas mixtas. Este comportamiento indica que, para este carbón, una dosis baja de colector mejora la selectividad del proceso.

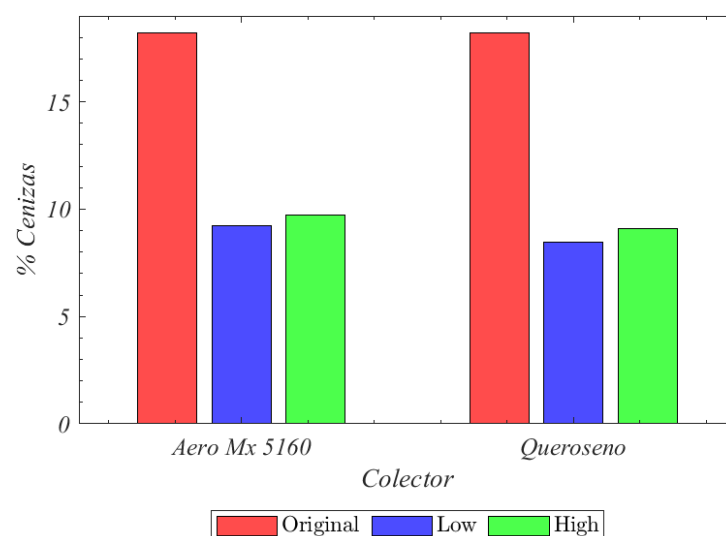


Figura 15. Cenizas en el carbón de Jamundí

Como se presenta en la **Figura 15**, el porcentaje de cenizas del carbón de Jamundí disminuye en los niveles *Low* y *High* a valores aproximados del 9% respecto a la muestra original para

ambos colectores (*AERO MX 5160* y *Queroseno*). La pequeña diferencia entre los dos niveles de concentración puede indicar una respuesta más estable y menos sensible a la variación del colector, ya que ambos funcionan de forma similar. Este comportamiento puede sugerir que el carbón de Jamundí tiene una composición mineralógica más balanceada y puede beneficiarse efectivamente bajo cualquier condición de colector.

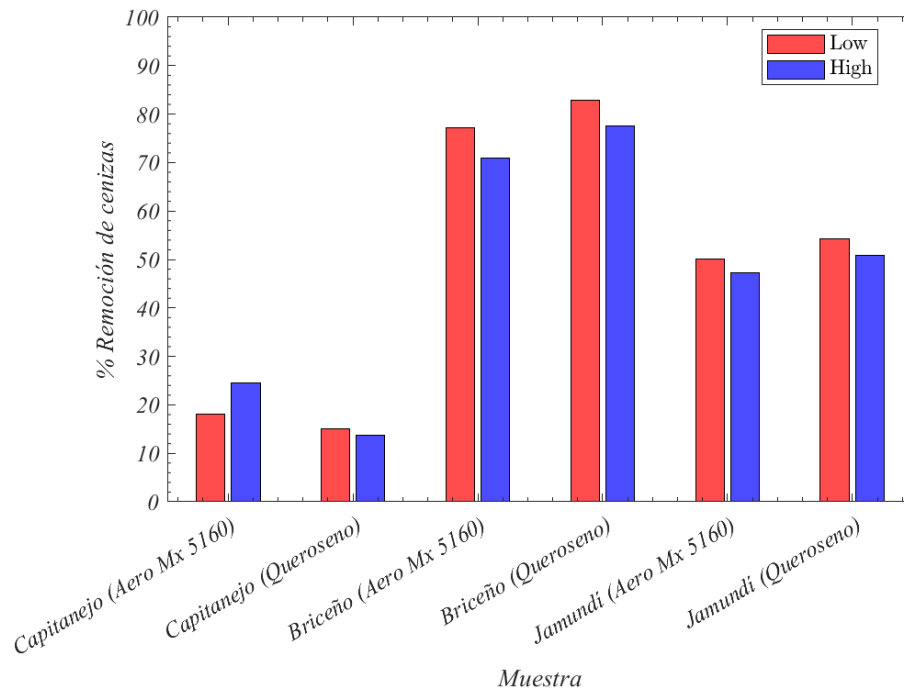


Figura 16. Remoción de cenizas

La **Figura 16** evidencia que la remoción de cenizas varía significativamente según el tipo de carbón y las condiciones de operación empleadas. En general, el colector *Queroseno* mostró una mayor capacidad de eliminación de cenizas, especialmente en la muestra de Briceño, donde bajo condiciones *Low* se alcanzó una remoción superior al 80%. Este comportamiento sugiere una mayor selectividad del *Queroseno*, posiblemente favorecida por la menor oxidación superficial y el carácter más hidrofóbico del carbón de Briceño, lo que facilita la separación de la materia mineral. Este tipo de diferencias en el comportamiento de los colectores se ha relacionado con la composición y características superficiales del carbón, que influyen directamente en su respuesta al proceso de flotación (Polat et al., 2003; Zhou et al., 2019). En contraste, el carbón de Capitanejo presentó una baja remoción de cenizas con ambos colectores, lo que sugiere una menor proporción de minerales fácilmente separables o una mineralogía menos favorable para la flotación. Estos resultados subrayan

la importancia de adaptar la estrategia de flotación al tipo de carbón y de evaluar no solo el rendimiento global, sino también, la calidad del concentrado.

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para realizar el análisis de varianza o ANOVA, se estableció un diseño de $3 \times 2 \times 2$ para evaluar las variables determinadas en el diseño experimental; el análisis para la remoción de cenizas se muestra en la **Tabla 9** y para el rendimiento en la **Tabla 10**.

Tabla 9. ANOVA de remoción de cenizas

Fuente de Variación	Grados de Libertad (DF)	Suma de Cuadrados (SS)	Factor de Distribución (F)	Prob>F
Colector	1	6.36	53.02	<.0001
Muestra	2	14117.95	58896.35	<.0001
Concentración	1	27.46	229.08	<.0001
Colector*Muestra	2	197.42	823.59	<.0001
Colector*Concentración	1	8.44	70.40	<.0001
Muestra*Concentración	2	71.76	299.37	<.0001
Colector*Muestra*Concentración	2	21.16	88.28	<.0001
Error	12	1.44	Prob > F	
Total	23	14451.98	<.0001	

Según los resultados mostrados en la **Tabla 9**, se puede observar con el factor F que todas las variables tienen un efecto significativo sobre la remoción de ceniza, aun así, la *muestra* es la variable que mayor efecto tiene, seguida por las interacciones de *colector*muestra* y *muestra*concentración*.

Tabla 10. ANOVA de rendimiento del proceso

Fuente de Variación	Grados de Libertad (DF)	Suma de Cuadrados (SS)	Factor de Distribución (F)	Prob>F
Colector	1	78.88	4.35	0.059
Muestra	2	1013.10	27.93	<.0001
Concentración	1	49.22	2.71	0.1254
Colector*Muestra	2	180.94	4.99	0.0265
Colector*Concentración	1	312.41	17.23	0.0013
Muestra*Concentración	2	500.44	13.80	0.0008
Colector*Muestra*Concentración	2	44.01	1.21	0.3312
Error	12	217.63	Prob > F	
Total	23	2396.62	<.0001	

Igualmente, con los resultados mostrados en la **Tabla 10**, se puede observar con el factor F que la *muestra* es la variable que mayor efecto tiene, seguida por las interacciones de *colector*concentración* y *muestra*concentración*.

Los resultados del ANOVA (**Tablas 9 y 10**) confirman que la muestra de carbón tiene el mayor efecto sobre tanto la remoción de cenizas como el rendimiento del proceso, lo cual es coherente con las diferencias mineralógicas, texturales y de composición química previamente observadas entre los carbones. Esto sugiere que las características intrínsecas del material determinan en gran medida su respuesta al proceso de flotación. La interacción *colector*muestra* también resultó significativa, lo que indica que la efectividad de cada colector depende del tipo de carbón, posiblemente por diferencias en la hidrofobicidad natural o en la distribución de la materia mineral. Adicionalmente, la interacción *muestra*concentración* fue relevante para ambas respuestas, lo que refleja que la dosificación óptima de reactivos no es universal, sino que debe adaptarse al tipo de muestra para lograr un equilibrio entre recuperación y calidad del concentrado.

4.4 EFECTO DEL TIPO Y CONCENTRACIÓN DE COLECTOR

Con el fin de cumplir el primer objetivo específico de este proyecto, se analizaron los efectos del tipo y concentración de colector en relación con la reducción de materia mineral presente en los tres tipos de carbón de alto rango utilizados, como la tercera etapa de este estudio.

4.4.1 Desempeño de colectores y concentraciones.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para la remoción de materia mineral y el rendimiento del proceso de flotación espumante, se evidencia un comportamiento diferenciado entre los colectores evaluados y su concentración. La evaluación estadística mediante medias ajustadas por mínimos cuadrados (LS), que se presenta en la **Tabla 11** permite realizar comparaciones entre tratamientos, controlando el efecto del tipo de carbón.

Tabla 11. Medias de mínimos cuadrados de la interacción colector-concentración

Combinación	Rendimiento (media LS), %	Remoción de cenizas (media LS), %
Aero Mx 5160 – Low	55.25	48.47
Aero Mx 5160 – High	65.33	47.52
Queroseno – Low	58.84	50.69
Queroseno – High	54.49	47.36

En cuanto al rendimiento, la mayor masa recuperada se obtiene al emplear *AERO MX 5160* a alta concentración, con un rendimiento ajustado de 65.33%. Esta combinación presenta una diferencia significativa con respecto a los demás tratamientos. Por otro lado, en los resultados de la remoción de cenizas, se observa el mejor desempeño con el *Queroseno* a baja concentración, alcanzando una media ajustada del 50.69%, lo cual indica que esta combinación favorece la limpieza del carbón, al reducir de manera considerable su contenido de materia mineral.

Estos comportamientos reflejan un compromiso técnico del proceso de flotación, mientras el uso de *AERO MX 5160* a alta concentración maximiza la recuperación, no optimiza la calidad del concentrado. Por el contrario, el *Queroseno* a baja concentración ofrece una

flotación más selectiva, con mejor remoción de cenizas, pero a costa de una menor masa recuperada.

Una posible explicación para este comportamiento es que el *AERO MX 5160*, al utilizarse en alta concentración, genera una espuma más estable y abundante, lo que favorece el arrastre de partículas finas, incluyendo parte del material mineral. Esto se refleja en una mayor recuperación, pero a costa de una menor selectividad del proceso. En contraste, el *Queroseno* a baja concentración produce una espuma menos densa, lo que limita el arrastre no deseado y mejora la remoción de cenizas. Esta interpretación se plantea como una hipótesis técnica, basada en las observaciones experimentales y debe corroborarse mediante un estudio complementario que involucre el análisis del comportamiento interfacial de los reactivos utilizados y la química superficial de los carbones.

4.4.2 Efecto AERO MX 5160.

El comportamiento observado del *AERO MX 5160* en los ensayos de flotación, se explica al compararlo con reactivos de estructura y propiedades similares descritos en la literatura, dado que no cuenta con una ficha técnica pública detallada. En cuanto, a su eficacia como colector aniónico puede relacionarse con lo reportado por Kumar et al. (2022), quienes señalan que ciertos surfactantes aniónicos como el SDS (dodecil sulfato de sodio) pueden mejorar la acción colectora y la selectividad del *Queroseno* cuando se utilizan en conjunto, lo que sugiere un efecto de mejora de eficiencia similar al mostrado por el *AERO MX 5160* frente al *Queroseno* en términos de rendimiento. Además, los mismos autores mencionan que los colectores de base oleosa usados tradicionalmente, como el *Queroseno*, “presentan un desempeño insatisfactorio sobre carbones oxidados, requiriendo altas dosis para compensar su baja reactividad superficial”. Esta afirmación se alinea con los resultados obtenidos, donde el *Queroseno* fue menos eficiente en la remoción de cenizas, en la muestra de carbón de Capitanejo, que presenta un mayor grado de oxidación.

Siguiendo la misma línea, Liu et al. (2022) destacan que el desempeño de un colector depende en gran medida de la composición química y la distribución de sus grupos funcionales hidrofóbicos e hidrofílicos. El *AERO MX 5160*, está compuesto por ditiofosfato y tionocarbamato, presenta una estructura que le permite adsorberse en diferentes tipos de superficies, específicamente, presenta afinidad por superficies parcialmente oxidadas gracias a su componente sulfidizante con propiedades colectoras (Mumbi et al., 2023), lo que facilita

su adsorción y mejora de recuperación en materiales difíciles. Esta propiedad lo hace comparable con otros colectores aniónicos analizados por Kadagala et al. (2021), como el oleato de sodio y la aldoxima arilo hidroxilo alquilo, donde ambos demostraron ser altamente efectivos en condiciones donde la flotación convencional suele presentar dificultades. De hecho, la aldoxima se asoció a la generación de ángulos de contacto elevados, una propiedad determinante en la eficacia del *AERO MX 5160*.

Por otro lado, el SDS, que también es usado como colector aniónico con propiedades similares, tiende a aumentar la recuperación de masa a costa de un mayor arrastre de materia mineral (Kumar et al., 2022; Kadagala et al., 2021), este comportamiento también fue identificado, donde el uso del *AERO MX 5160* resultó en altos rendimientos, pero una disminución en la remoción de cenizas en las muestras menos oxidadas, provenientes de Briceño y Jamundí.

4.4.3 Efecto Queroseno.

En cuanto, al comportamiento del *Queroseno*, este colector demostró ser más efectivo en la remoción de cenizas, donde concretamente alcanzó valores de hasta un 82.87% de remoción de cenizas. Este comportamiento puede explicarse por el mecanismo de acción del *Queroseno*, que, al ser un colector no polar de base oleosa, este se distribuye formando una película delgada continua sobre la superficie del carbón y de las burbujas de aire. Esta capa modifica la interfaz sólido-líquido, reduciendo la estabilidad de la película líquida delgada que separa a la partícula de la burbuja, lo que facilita la adhesión entre ambos durante la flotación (Chen et al., 2022).

Según Kadagala et al (2021), los colectores no polares como es el caso del *Queroseno* tienen una mayor eficacia sobre superficies inherentemente hidrofóbicas y un bajo desempeño sobre carbones oxidados. Esto permite explicar la elevada remoción de cenizas obtenida en el carbón de Briceño al utilizar queroseno, tal como se observa en la **Figura 16**. Aunque los tres carbones utilizados corresponden a rangos similares, el carbón de Briceño presenta una menor oxidación superficial, lo que favorece la acción del colector no polar y contribuye a una mayor separación de la materia mineral. Además, el buen desempeño podría atribuirse a una menor interferencia de minerales oxidados y una interacción físico-superficial más favorable entre el carbón y el colector.

Adicionalmente, un estudio de Sahinoglu (2018) reporta que el uso de *Queroseno* mejora la recuperación de materia orgánica cuando se aplica a carbones finos de alta cenizas, reforzando los resultados obtenidos en los carbones de Briceño y Jamundí, dos muestras que, en su estado original presentaban contenidos de cenizas en base seca de 25.08% y 18.48%, siendo los más altos entre los tres carbones analizados, logrando reducir ese contenido a 4.30% y 8.46% respectivamente, superando al *AERO MX 5160* en términos de remoción de cenizas.

Por último, aunque el *Queroseno* mostró una eficiencia superior en la remoción de cenizas, sus valores de rendimiento fueron inferiores a los obtenidos con el *AERO MX 5160*, lo cual puede atribuirse a su mecanismo de acción, este no contiene grupos funcionales capaces de interactuar químicamente con sitios oxidados o con impurezas minerales, por lo que su capacidad de recuperación se ve limitada. Esto contrasta con el *AERO MX 5160*, que como se mencionó anteriormente, contiene componentes activos, capaces de adsorberse sobre superficies parcialmente oxidadas y mejorar tanto la hidrofobicidad como la selectividad del proceso (Mumbi et al., 2023). Por tanto, si bien el *Queroseno* puede ser muy efectivo en sistemas donde predomina la hidrofobicidad natural, así mismo, su rendimiento disminuye en carbones más complejos, lo que justifica los mejores resultados obtenidos en cuanto a rendimiento por el *AERO MX 5160*.

4.4.4 Efecto de la concentración.

Los resultados experimentales muestran que la concentración del colector influye de manera significativa en la remoción de cenizas, además, su interacción con el tipo de muestra y la naturaleza del colector afecta de forma considerable el rendimiento global del proceso. De forma general, en la mayoría de los casos la concentración alta mejoró la recuperación, no obstante, hubo casos donde no generó beneficios y además resultó en una menor remoción de cenizas, lo que puede ser debido a un fenómeno de saturación.

Este comportamiento es consistente con lo reportado por Kumar et al. (2021), quienes determinaron que tanto el tipo como la dosis de colector afectan fuertemente la recuperación y el contenido de cenizas del carbón flotado. En sus pruebas observaron que la recuperación aumentaba al incrementar la concentración del colector hasta cierto punto, pero por encima los valores se estabilizan o incluso disminuyen. De forma complementaria, Erol et al. (2003) reportaron que cuando la concentración supera un umbral determinado, la recuperación

comienza a disminuir y el contenido de cenizas aumenta, esto lo atribuyen a una adsorción excesiva del colector sobre las partículas, esto reduce su hidrofobicidad o genera aglomeración, afectando la eficiencia de separación. Lo cual está relacionado con la sobredosificación, donde el exceso de reactivo forma capas gruesas que no permiten un contacto efectivo entre las partículas y las burbujas, o bien favorecen el arrastre de materia mineral, reduciendo la selectividad del proceso.

Teniendo todo esto en cuenta, se refuerza la importancia de definir una concentración óptima de colector para cada tipo de carbón, ya que ni la subdosificación ni la sobredosificación garantizan un desempeño eficiente del proceso.

4.5 INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Con el fin de cumplir el segundo objetivo específico de este proyecto, se analizó la influencia de las características físico-químicas en relación con la eficiencia del proceso de flotación-espumante considerando los tres tipos de carbón de alto rango que se utilizaron, como la cuarta y última etapa de este estudio. Dentro de estas, se evaluaron propiedades físico-químicas clave como lo son materia volátil, carbono fijo, rango, oxidación del carbón, y composición de cenizas.

4.5.1 Materia volátil, carbono fijo y rango.

Los tres carbones evaluados presentaron diferencias notables en su análisis próximo (**Tabla 4**). En particular, los carbones de Capitanejo y Jamundí mostraron un mayor contenido de *materia volátil*, lo cual se asocia comúnmente con una mayor reactividad y una menor hidrofobicidad superficial. Esta característica puede influir negativamente en el rendimiento del proceso de flotación, ya que las partículas menos hidrofóbicas tienden a interactuar con menor eficacia con las burbujas de aire. En cambio, el carbón de Briceño presentó el valor más bajo de *materia volátil* y el mayor contenido de *carbono fijo*, lo que sugiere un mayor grado de carbonificación y una hidrofobicidad más pronunciada, condiciones que suelen favorecer la recuperación por flotación.

Estos aspectos del análisis próximo son coherentes con los resultados experimentales obtenidos: el carbón de Briceño mostró un buen rendimiento en recuperación bajo condiciones específicas (nivel *Low* y *Queroseno*), así como una alta remoción de cenizas, lo

que indica un comportamiento favorable tanto en eficiencia como en selectividad. Por otro lado, los carbones de Capitanejo y Jamundí, aunque con mayor contenido de *materia volátil*, lograron mejores resultados en rendimiento cuando se empleó el colector *AERO MX 5160*, lo cual sugiere que este reactivo puede compensar parcialmente la menor hidrofobicidad de estos materiales. En conjunto, los resultados confirman que las propiedades determinadas en el análisis próximo tienen un efecto directo sobre el comportamiento de cada muestra durante la flotación.

Por otro lado, con los anteriores parámetros, se obtuvo su *rango* de acuerdo con la norma ASTM D-388 (**Tabla 7**), clasificando a los tres carbones como de alto rango: Capitanejo y Briceño como Semi-antracitas, y Jamundí como Bituminoso de bajo nivel volátil. Con esta clasificación, podemos inferir que el *rango* influye directamente en el rendimiento del proceso de flotación. Como ya se mencionó anteriormente, la hidrofobicidad natural del carbón favorece la recuperación en el proceso, y esta puede ser afectada tanto por su contenido de materia volátil y carbono fijo, como por la cantidad de oxígeno presente.

Los carbones de alto *rango* son muy fáciles de oxidar cuando se los expone al aire (Wen et al., 2017), lo que podría desencadenar la formación de grupos funcionales con oxígeno que se unirían a las moléculas de agua mediante enlaces de hidrógeno. Según Wen et al. (2017), mientras más alto sea el contenido de carbono en carbones de alto rango, menor será el contenido de oxígeno presente, lo que sugiere una menor oxidación superficial y una mayor hidrofobicidad en las partículas del carbón, facilitando así el proceso de flotación.

4.5.2 Grado de oxidación.

La *oxidación* del carbón es una característica que afecta negativamente el proceso de flotación, debido a la adsorción física del oxígeno que permite la formación de grupos fenólicos y carboxílicos polares, los cuales incrementan la humectabilidad y la carga superficial de las partículas, dificultando así el proceso de flotación; cabe resaltar que así sean pequeñas cantidades de oxígeno, estas son suficientes para provocar la oxidación del carbón (Polat, et al., 2003). Según el análisis último (**Tabla 6**), el carbón de Capitanejo presenta el mayor contenido de oxígeno (6.81%), lo que sugiere un mayor grado de *oxidación* superficial, lo que podría estar asociada a una mayor exposición al ambiente, un mayor tiempo de almacenamiento o a la *oxidación* natural del mismo; el carbón de Briceño presenta un contenido bajo de oxígeno (0.60%), es decir que presenta una superficie poco

oxidada; y el carbón de Jamundí presenta un contenido intermedio de oxígeno (2.08%), por lo que podría tener una superficie con *oxidación* parcial.

Con estas condiciones, para el de Capitanejo, aunque su superficie sea más resistente por ser un carbón de alto rango (Semi-antracita), su visible grado de *oxidación* podría generar bajos rendimientos y se debería implementar estrategias de acondicionamiento para mejorar el proceso de beneficio; para el de Briceño, que también es un carbón de alto rango (Semi-antracita), la flotación es muy favorable para su beneficio debido a su baja *oxidación*, y para el de Jamundí, que es un carbón Bituminoso (bajo en volátiles), lo que lo hace más sensible a la oxidación, es apto para la flotación debido a su *oxidación parcial*, aunque se podría considerar una caracterización más detallada de su estructura y superficie.

Por otro lado, la *oxidación* de estos carbones podría sugerir una serie de consecuencias que afecten directamente a la eficiencia del proceso de flotación-espumante, entre las cuales están la disminución de la flotabilidad, debido a que las superficies oxidadas son menos hidrofóbicas, impidiendo así la adhesión de las partículas de carbón a las burbujas de aire que afecta directamente al rendimiento del proceso; Polat et al. (2003) menciona que puede reducirse hasta en un 70% el rendimiento de la flotación para carbones bituminosos oxidados; y una mayor cantidad de reactivos, es decir una mayor concentración tanto de colectores como de espumante, con el objetivo de compensar esa pérdida de hidrofobicidad en el carbón. En algunos casos, puede que se necesite algún tipo de acondicionamiento químico o pretratamiento para mantener una buena eficiencia del proceso de flotación.

4.5.3 Composición de la materia mineral.

La materia mineral presente en el carbón corresponde a la fracción inorgánica contenida en la matriz carbonosa. Esta materia mineral representa el material parental de las cenizas obtenidas tras la combustión, y su composición suele estimarse a partir de los datos de cenizas y los óxidos que las conforman (Speight, 2013). Los minerales más comunes que la componen son las arcillas, los carbonatos, minerales de óxido y el cuarzo. La **Tabla 12**, presenta la composición de la materia mineral.

Tabla 12. Tipos de minerales del carbón (Speight, 2013)

Grupo mineral	Componentes mineralógicos
Minerales arcillosos	Caolinita
	Illita
	Montmorillonita
	Sericita
Carbonatos	Siderita
	Calcita
	Dolomita
Sulfuros	Pirita
	Marcasita
Óxidos	Hematita
Cuarzo	Cuarzo

Al quemar esta materia, se transforma en una mezcla de óxidos metálicos y no metálicos que conforman las cenizas, compuesta principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO y MgO , con trazas de Na_2O , K_2O , TiO_2 y P_2O_5 (Vassilev & Vassileva, 2007). A partir de la composición de las cenizas, se puede inferir la naturaleza y proporción de los minerales presentes en la materia mineral original.

Los óxidos de silicio y aluminio, en conjunto con niveles menores de Na_2O , K_2O , TiO_2 , son indicadores de la presencia de minerales arcillosos, que, durante la combustión pierden agua estructural y se transforman en sílice amorfa, alúmina y otros óxidos residuales (Speight, 2013). De forma similar, el óxido de calcio en las cenizas es producto de la descomposición térmica de carbonatos como la calcita o la siderita, los cuales pierden CO_2 al ser sometidos a temperaturas elevadas generando los óxidos correspondientes. Por su parte, los óxidos metálicos como la hematita tienden a permanecer como Fe_2O_3 , ya sea formado por la oxidación de otras fases o porque ya estaban presentes originalmente. Así mismo el cuarzo, al ser un mineral estable térmicamente, su presencia en las cenizas se refleja directamente como SiO_2 residual.

Los datos de composición de las cenizas presentados en la **Tabla 5**, permiten identificar los principales óxidos formadores, a partir de los cuales se discuten a continuación sus posibles efectos en el proceso de flotación-espumante.

- **Minerales arcillosos y cuarzo.**

Los minerales arcillosos son aluminosilicatos hidratados, que se caracterizan por una estructura laminar. Como se describe en la compilación del Servicio Geológico Colombiano (Prieto, Guatame & Cárdenas, 2019), en la mayor parte del territorio nacional las arcillas más comunes son la caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e illita ($((\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})$), aunque se han identificado la presencia de bentonitas de tipo montmorillonita ($(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) en regiones como Valle del Cauca.

La presencia de arcillas en el carbón es un factor que deteriora la eficiencia del proceso de flotación. Estas partículas afectan el proceso por dos mecanismos principales. Por un lado, el recubrimiento de la superficie del carbón por las arcillas puede interferir con la adsorción del colector y reducir la hidrofobicidad natural del carbón. Por otro lado, el arrastre mecánico de partículas finas hacia la espuma, lo que disminuye la calidad del concentrado (Bai et al., 2020; Xia, Li, Wu & Niu, 2021). Además, una alta proporción de arcillas puede incrementar la viscosidad de la pulpa, lo que dificulta la movilidad de las burbujas y el transporte de partículas hacia la superficie, lo que disminuye la eficiencia (Bai et al., 2020; Yu et al., 2017).

Dentro de los distintos tipos de arcillas, la montmorillonita es considerada como la más perjudicial para el proceso de flotación del carbón. Xing et al. (2019) señalan que esta arcilla incrementa significativamente el tiempo de inducción y reduce la cinética del contacto entre burbuja-partícula, lo que afecta la recuperación. Adicionalmente, la montmorillonita forma sitios hidrofílicos sobre la superficie del carbón que dificultan la ruptura de la película líquida entre el carbón y la burbuja, interfiriendo con la adhesión efectiva del colector.

Por su parte, la caolinita, aunque es menos perjudicial que la montmorillonita, también afecta al proceso de manera significativa. Su alta dispersabilidad en medio acuoso favorece la adhesión a la superficie del carbón. Además, contribuye al arrastre mecánico por su morfología fina y su carácter hidrofílico (Liang, Tan, Li &, 2019).

En cuanto a la illita, se considera que su efecto es menos intenso que las demás, sin embargo, debido a sus propiedades estructurales y de hidratación, similares al de otras arcillas su efecto sigue siendo negativo.

Finalmente, aunque el cuarzo no es una arcilla, comparte ciertas características con ellas que también afectan la flotación. Liang et al. (2019) mencionan que su naturaleza hidrofílica y

tamaño de partícula fino facilitan su arrastre mecánico hacia la espuma, pero, a diferencia de las arcillas, el cuarzo no produce recubrimiento superficial, no obstante, afecta la selectividad del proceso, al ser recolectado junto con el carbón flotado.

Como se observa en la **Figura 16**, el carbón de Capitanejo muestra el comportamiento menos eficiente con respecto a la remoción de cenizas, teniendo los valores más bajos entre los 3 carbones evaluados. Este resultado puede atribuirse a su elevada proporción de SiO_2 (63.82%) y Al_2O_3 (28.67%), los cuales indican una alta concentración de minerales arcillosos y cuarzo. La presencia de las arcillas favorece los dos mecanismos de recubrimiento y arrastre mencionados con anterioridad. Además, el elevado contenido de cuarzo, aunque no actúa por recubrimiento, puede agravar el arrastre. Estas condiciones reflejan los buenos rendimientos a costa de una baja eliminación de impurezas.

En contraste, el carbón de Briceño presenta el mejor desempeño global en términos de remoción de cenizas, lo que puede explicarse por su bajo contenido de SiO_2 (25.77%) y Al_2O_3 (6.59%), que sugiere una baja proporción de minerales arcillosos y cuarzo. Esto permite que la superficie del carbón conserve su hidrofobicidad natural y facilite la interacción efectiva con el colector.

El caso del carbón de Jamundí con una composición de SiO_2 (38.12%) y Al_2O_3 (21.43%) intermedia, sus resultados tanto de rendimiento como de remoción son favorables. Considerando su origen geográfico, es una muestra donde es más probable la presencia de montmorillonita, reconocida por su efecto altamente negativo sobre la flotación. No obstante, el buen desempeño sugiere que, si bien la montmorillonita puede estar presente, su concentración no es lo suficientemente alta como para controlar el comportamiento del sistema, o bien que los reactivos de flotación contrarrestan su efecto.

- **Óxidos metálicos.**

La presencia de hematita, uno de los principales óxidos metálicos en las cenizas del carbón, tienen un impacto notable en la eficiencia del proceso de flotación. De acuerdo con los análisis de cenizas, solo el carbón de Briceño presenta un contenido significativo de Fe_2O_3 (29.07%). Este dato se relaciona directamente con los resultados experimentales, donde tuvo la mayor remoción de cenizas.

La hematita es un mineral intrínsecamente hidrofílico, pero su superficie puede sufrir procesos de hidroxilación al interactuar con moléculas de agua en solución, formando grupos funcionales tipo Fe-OH. Esta estructura facilita la formación de una interfaz hidratada multilaminar que reduce aún más su afinidad por los colectores (Zhang, Lin, Guo, Sun & Zhang, 2023). Como resultado, la hematita tiende a hundirse con facilidad en la celda de flotación, lo que aumenta la remoción de material inorgánico cuando se encuentra libre o parcialmente liberada de la matriz carbonosa.

Adicionalmente, Li et al. (2023) reportan que la hematita puede influir en la estabilidad de la espuma de flotación. Las partículas con hidrofobicidad intermedia, como ciertas fracciones de hematita, pueden aumentar la rigidez de la espuma al actuar como puente en la película del burbujeo, lo que favorece la migración de partículas hacia el fondo y mejora la selectividad del proceso.

En conjunto, la elevada remoción de cenizas observada en el carbón de Briceño, no solo se explica por una menor proporción de aluminosilicatos, sino también por una contribución de la hematita como fase mineral densa y no flotable. Esta característica favorece su eliminación y permite mejorar la calidad del concentrado.

- **Carbonatos.**

La presencia de carbonatos, representados principalmente por el óxido de calcio en las cenizas del carbón, ejerce una influencia sobre el proceso de flotación. De acuerdo con los análisis de cenizas, solo el carbón de Jamundí presenta un contenido considerable de CaO (10.19%), mientras que en los demás carbones su concentración es inferior a 1.3%. Esta diferencia en la composición se refleja en los resultados, donde el carbón de Jamundí presentó una remoción de cenizas intermedia.

Desde el punto de vista físico-químico, los carbonatos como la calcita y la dolomita se disuelven parcialmente en medio acuoso, liberando iones Ca^{2+} que alteran la química superficial de las partículas. Estos iones pueden modificar las cargas superficiales y generar interacciones competitivas con los colectores (Sun et al., 2021 & Dong et al., 2025). Además, se ha reportado que la formación de carbonato cálcico amorfo intensifica la reactividad superficial y dificultan la acción de colectores aniónicos como el oleato (Li et al., 2022).

Este comportamiento, puede explicar, en parte, los resultados obtenidos con el carbón de Jamundí. Aunque la flotación no se ve fuertemente afectada, la presencia de carbonatos puede condicionar tanto la recuperación como la eficiencia de separación. Como señalan Dong et al., 2025, los minerales que contienen calcio presentan mecanismos de flotación diferentes, lo cual exige métodos específicos de beneficio. Por tanto, aunque el CaO no fue un componente dominante, su influencia debe ser considerada, dado su potencial para alterar la respuesta del carbón durante el proceso de flotación-espumante.

CONCLUSIONES

El uso de *AERO MX 5160* a alta concentración (aproximadamente 470 g/t) produjo el mayor rendimiento global del proceso, alcanzando una recuperación ajustada de 65.33%, mientras que el *Queroseno* a baja concentración (aproximadamente 270 g/t) obtuvo el mayor valor de remoción de cenizas con un 50.69%, confirmando que existe un compromiso entre recuperación y calidad del concentrado.

El carbón de Briceño, con 64.02% de carbono fijo y 6.98% de materia volátil, presentó la mayor remoción de cenizas individual (82.87%) utilizando queroseno a baja concentración, y una recuperación aceptable (58.84%), lo que evidencia su alta hidrofobicidad natural y comportamiento favorable en flotación sin necesidad de colectores complejos.

El carbón de Capitanejo, a pesar de tener el mayor contenido de carbono fijo (80.16%), mostró un menor desempeño en remoción de cenizas (máximo 39.21%) asociado a su alto contenido de oxígeno (6.81%), lo que sugiere un mayor grado de oxidación superficial que reduce la flotabilidad. Este comportamiento fue compensado parcialmente por el *AERO MX 5160*, que mejoró la recuperación hasta un 65.33%.

El análisis ANOVA demostró que la variable con mayor efecto sobre el rendimiento y la remoción de cenizas fue el tipo de muestra, con un $F > 27$ para rendimiento y $F > 58,000$ para remoción de cenizas, mientras que la interacción colector-muestra y muestra-concentración también resultaron altamente significativas ($p < 0.0001$), validando estadísticamente que la respuesta del proceso depende principalmente de las propiedades del carbón.

El análisis conjunto de las composiciones de cenizas y los resultados de flotación confirma que, altos contenidos de SiO_2 y Al_2O_3 , como los observados en el carbón de Capitanejo (63.82% y 28.67%, respectivamente), se asocian con una menor eficiencia en la remoción de cenizas, ya que estos compuestos corresponden típicamente a minerales arcillosos y cuarzo, los cuales pueden generar fenómenos de recubrimiento superficial e interferencia por arrastre. Por el contrario, el carbón de Briceño, con menores niveles de estos, mostró un comportamiento favorable.

La composición de las cenizas reveló que los carbones con altos contenidos de Fe_2O_3 (29.07% en Briceño) y CaO (10.19% en Jamundí), presentaron mayores desafíos en términos

de selectividad, ya que sus impurezas mineralógicas finamente diseminadas favorecieron el arrastre por entrainment, lo que exigió condiciones más precisas para lograr una remoción eficiente. En el caso de Jamundí, se sugiere que la presencia de carbonatos contribuyó a la liberación de iones Ca^{2+} en el medio de flotación, afectando la adsorción del colector y reduciendo la estabilidad de la espuma. Por otro lado, el alto contenido de Fe_2O_3 en Briceño si bien afecta la selectividad del proceso, la naturaleza hidrofílica del mineral facilitó su separación del carbón.

RECOMENDACIONES

Incluir técnicas complementarias de caracterización mineralógica y superficial, como DRX y análisis de grupos funcionales por FTIR o XPS, para entender mejor la interacción carbón-reactivo y optimizar la elección de colectores.

Implementar y evaluar más variables para acondicionar el proceso de flotación, como, por ejemplo, el tamaño de partícula del carbón, el pH y agentes modificadores para la solución de la pulpa y agua.

Evaluar el uso de sistemas combinados de colectores o pretratamientos químicos que permitan mejorar la hidrofobicidad de carbones parcialmente oxidados, como el de Capitanejo, y aumentar la selectividad del proceso.

Evaluar la implementación de un pretratamiento físico, con el objetivo de liberar mejor la ganga mineral finamente diseminada y mejorar la exposición de las superficies carbonosas, con el fin de favorecer la acción de los colectores y aumentar la eficiencia del proceso.

Explorar la aplicación del proceso en columnas de flotación o en condiciones más próximas al entorno industrial, con el fin de validar la escalabilidad del proceso y su viabilidad en operaciones reales de beneficio de carbón colombiano.

REFERENCIAS

- ASTM Standards. (2010). Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. In ASTM Standards: Vol. 05.06. ASTM. doi: 10.1520/D3174-04
- ASTM Standards. (2023). Standard Classification of Coals by Rank. In ASTM Standards: Vol. 05.06. ASTM. doi: 10.1520/D0388-23
- Bai, H., Liu, Y., Zhao, Y., Chen, T., Chen, L., Jiao, X., Qing, C. & Song, S.(2020). Effects of clay species on coal flotation under the cationic regulation. *International Journal of Coal Science & Technology*, Vol. 753, 137626. doi: 10.1016/j.cplett.2020.137626
- Bai, H., Liu, Y., Zhao, Y., Chen, T., Li, H., Chen, L. & Song, S. (2020). Regulation of coal flotation by the cations in the presence of clay. *Fuel*, 271(1), 117590. doi: 10.1016/j.fuel.2020.117590.
- Barraza, J., Guerrero, J. & Piñeres, J. (2013). Flotation of a refuse tailing fine coal slurry. *Fuel Processing Technology*, Vol. 106, 498-500. doi: 10.1016/j.fuproc.2012.09.018
- Bulatovic, S. M. (2007). *Handbook of flotation reagents: Chemistry, theory and practice*. doi: 10.1016/B978-0-444-53029-5.X5009-6
- Chen, Y., Zhou, B., Zhang, X., Yang, S. & Huang, W. (2022). Understanding the role of kerosene on the coal particle and bubble attachment process. *Fuel*, 307(1), 121915. doi: 10.1016/j.fuel.2021.121915.
- Clariant. (2020). Arkopal N 060 (Hoja técnica). Recuperado el 13 de junio de 2025 de https://atamankimya.com/Assets/Documents/Arkopal_N_060_ataman_kimya_20201013_231724.pdf
- Dong, L., Cui, Y., Qiao, L., Lan, S., Zheng, Q., Shen, P. & Liu, D. (2025). A critical review on the flotation of calcium-containing minerals. *Separation and Purification Technology*, 360 (Part 2), 131082. doi: 10.1016/j.seppur.2024.131082.
- Erol, M., Colduroglu, C. & Aktas, Z. (2003). The effect of reagents and reagent mixtures on froth flotation of coal fines. *International Journal of Mineral Processing*, 71(1–4), 131-145. doi: 10.1016/S0301-7516(03)00034-6.

González Dávila, G. (2020, Agosto). Energía, fuentes renovables y sustentabilidad [Web log post]. Recuperado de <https://ceiba.org.mx/ggd-energia-fuentes-renovables-y-sustentabilidad/>

Guerrero Pérez, J. (2017). Efecto de los parámetros químicos, operacionales y petrográficos sobre la cinética de flotación de carbones (Tesis de doctorado). Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Guerrero, J. (2012). Cinética de flotación de los lodos finos de carbón de la mina Cerrejón (Guajira) utilizando celda de flotación (Tesis de maestría). Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Kadagala, M. R., Nikkam, S. & Tripathy, S. K. (2021). A review on flotation of coal using mixed reagent systems. *Minerals Engineering*, 173(1), 107217. doi: 10.1016/j.mineng.2021.107217.

Kumar, B., Das, B., Garain, A., Rai, S., Begum, W., Inamuddin, M., Mondal, M. H., Bhattarai, A. & Saha, B. (2022). Diverse utilization of surfactants in coal-floatation for the sustainable development of clean coal production and environmental safety: a review. *RSC Advances*, 12(37), 23973-23988. doi: 10.1039/d2ra02861a.

Kumar, P. S., Sivrikaya, O., Pradhan, S. & Nagannor, P. C. (2021). Flotation performance analysis on coal washery rejects. *Energy Geoscience*, 2(3), 211-217. doi: 10.1016/j.engeos.2021.04.001.

Li, B., Shi, Q., Liu, D., Jin, S., Luo, Q. & Wang, Z. (2022). The effect of nascent calcium carbonate inhibiting the flotation behavior of calcite. *Minerals Engineering*, 180(1), 107478. doi: 10.1016/j.mineng.2022.107478.

Li, R., Luo, X., Wen, S., Li, C., Wei, D., Yang, W., Zhang, Y., Zhu, Y. & Wang, Y. (2023). Three-phase froth stability in hematite flotation using DDA as a collector. *Minerals Engineering*, 195(1), 108023. doi: 10.1016/j.mineng.2023.108023.

Liang, L., Tan, J., Li, B. & Xie, G. (2019). Reducing quartz entrainment in fine coal flotation by polyaluminum chloride. *Fuel*, 235(1), 150-157. doi: 10.1016/j.fuel.2018.07.106.

Liu, M., Yu, H., Zhang, H., Wang, K., Tan, X. & Liu, Q. (2022). Roles of the hydrophobic and hydrophilic groups of collectors in the flotation of different-sized mineral particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 637(1), 128262. doi: 10.1016/j.colsurfa.2022.128262.

Luo, X., Wang, Y., Wen, S., Ma, M., Sun, C., Yin, W. & Ma, Y. (2016). Effect of carbonate minerals on quartz flotation behavior under conditions of reverse anionic flotation of iron ores. *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 152, 1-6. doi: 10.1016/j.minpro.2016.04.008.

Ma, M., Wang, W. & Zhang, K. (2022). Occurrence Characteristics of Fine-Grained Pyrite in Coal and Its Scaling Effect on Flotation Desulfurization. *ACS OMEGA*, 7 (46), 42467-42481. doi: 10.1021/acsomega.2c05698.

Markič, M., Kalan, Z., Pezdič, J., & Faganeli, J. (2007). H/C versus O/C atomic ratio characterization of selected coals in Slovenia. *Geologija*, 50(2), 403-426. doi: 10.5474/geologija.2007.028

Meshram, P., Purohit, B. K., Sinha, M. K., Sahu, S. K. & Pandey, B. D. (2015). Demineralization of low-grade coal – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41(1), 745-761. doi: 10.1016/j.rser.2014.08.072.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2021). Minería de carbón en Colombia: Transformando el futuro de la industria. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.

Mumbi, R., Peart, M., Mbao, B., Zulu, J. & Arinaitwe, E. (junio, 2023). AERO XR series collectors: Safer, custom-formulated alternatives to xanthates in various applications. En K. C. Sole (Presidencia), Copper Cobalt Africa 2023, incorporating the 10th Southern African Base Metals Conference. Simposio llevado a cabo en el congreso The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Livingstone, Zambia.

Navarro Espinosa, I. (2015). Remoción de carbón inquemado en cenizas de fondo de caldera mediante flotación por lotes (Tesis de maestría). Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Polat, M., Polat, H. & Chander, S. (2003). Physical and chemical interactions in coal flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 72(1–4), 199-213. doi: 10.1016/S0301-7516(03)00099-1.

- Prieto R., G., Guatame, C. L. y Cárdenas, S. C. (comps.). (2019). *Recursos minerales de Colombia, vol. 1*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Sahinoglu, E. (2018). Cleaning of high pyritic sulfur fine coal via flotation. *Advanced Powder Technology*, 29(7), 1703-1712. doi: 10.1016/j.appt.2018.04.005.
- Shahbazi, B. & Chehreh Chelgani, S. (2016). Modeling of fine coal flotation separation based on particle characteristics and hydrodynamic conditions. *International Journal of Coal Science & Technology*, 3(4), 429-439. doi: 10.1007/s40789-016-0147-9.
- Speight, J. G. (2005). *Handbook of coal analysis*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Speight, J. G. (2013). *The chemistry and technology of coal*. Boca Raton: CRC Press.
- Sun, W., Dai, S., Liu, W., Li, P., Duan, H. & Yu, X. (2021). Effect of Ca(II) on anionic/cationic flotation of magnesite ore. *Minerals Engineering*, 163(1), 106778. doi: 10.1016/j.mineng.2021.106778.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2012). *La cadena del carbón*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Vassilev, S. V. & Vassileva, C. G. (2007). A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. *Fuel*, 86(10–11), 1490-1512. doi: 10.1016/j.fuel.2006.11.020.
- Wang, G., Bai, X., Wu, C., Li, W., Liu, K. & Kiani, A. (2018). Recent advances in the beneficiation of ultrafine coal particles. *Fuel Processing Technology*, 178(1), 104-125. doi: 10.1016/j.fuproc.2018.04.035.
- Wang, B. & Peng, Y. (2013). The behaviour of mineral matter in fine coal flotation using saline water. *Fuel*, 109(1), 309-315. doi: 10.1016/j.fuel.2013.01.030.
- Wills, B. A. & Finch, J. A. (2016). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8^a ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Wen, B., Xia, W. & Sokolovic, J. (2017). Recent advances in effective collectors for enhancing the flotation of low rank/oxidized coals. *Powder Technology*, Vol. 319, 1-11. doi: 10.1016/j.powtec.2017.06.030.

Xia, W., Li, Y., Wu, F. & Niu, C. (2021). Enhanced flotation selectivity of fine coal from kaolinite by anionic polyacrylamide pre-conditioning. *Journal of Molecular Liquids*, 334(1), 116083. doi: 10.1016/j.molliq.2021.116083.

Xia, W., Ren, C., Peng, Y. & Pan, D. (2015). Comparison of traditional and zero-conditioning flotation performances of oxidized anthracite coal. *Powder Technology*, 275(1), 280-283. doi: 10.1016/j.powtec.2015.02.002.

Xing, Y., Xu, M., Guo, F., Luo, J., Zhang, Y., Cao, Y. & Gui, X. (2019). Role of different types of clay in the floatability of coal: Induction time and bubble-particle attachment kinetics analysis. *Powder Technology*, 344(1), 814-818. doi: 10.1016/j.powtec.2018.12.074.

Yu, Y., Cheng, G., Ma, L., Huang, G., Wu, L. & Xu, H. (2017). Effect of agitation on the interaction of coal and kaolinite in flotation. *Powder Technology*, 313(1), 122-128. doi: 10.1016/j.powtec.2017.03.002.

Zhang, H., Lin, S., Guo, Z., Sun, W. & Zhang, C. (2023). Selective separation mechanism of hematite from quartz by anionic reverse flotation: Implications from surface hydroxylation. *Applied Surface Science*, 614(1), 156056. doi: 10.1016/j.apsusc.2022.156056.

Zhou, Y., Albijanic, B., Tadesse, B., Wang, Y., Yang, J., Li, G., & Zhu, X. (2019). Surface hydrophobicity of sub-bituminous and meta-bituminous coal and their flotation kinetics. *Fuel*, 242(1), 416-424. doi: 10.1016/j.fuel.2019.01.051.

ANEXOS

A. DETERMINACIÓN DE DOS AGENTES Y DOS CONCENTRACIONES DE COLECTORES A EVALUAR

Tabla A-1. Propiedades de los reactivos

Propiedad/reactivo	Arkopal N 060	Queroseno	Aero Mx 5160
Color	Incoloro o ligeramente amarillo	Incoloro o ligeramente amarillo	Amarillo al marrón
Aspecto	Líquido viscoso	Líquido	Líquido claro
Olor	Ligero, fenólico	Aceitoso	Alcohol
Gravedad específica	1.02 (a 50 °C)	0.79 - 0.8	1.1 - 1.2
Punto de Fusión	< -10°C	-50 °C	-5 °C
Punto de inflamación	>220 °C	38 °C	102 °C
pH	6 - 8	—	>12
Solubilidad en agua	Parcial	Insoluble	Soluble
Propiedades hidrofóbicas / Función	Estabiliza espuma, favorece dispersión de partículas	Alta, incrementa hidrofobicidad del carbón	Muy alta, especializada en minerales de superficies complejas
Compatibilidad con otros reactivos	Compatible con reactivos iónicos y no iónicos	Requiere espumante adicional	Ligero efecto espumante, compatible con espumantes si se requiere
Selectividad hacia Impurezas	No aplica, actúa como dispersante	Moderada	Alta, especialmente silicatos
Costo	Moderado, buena disponibilidad	Bajo, fácil de adquirir	Moderado a alto, disponibilidad limitada

Tabla A-2. Pruebas preliminares

Localización de la muestra	Colector	Sólidos en pulpa	Concentración Colector, g/ton c	Concentración Espumante, g/ton c	Cenizas final bs, %	Rendimiento másico bs, %	Remoción de cenizas bs, %
Jamundí	Queroseno	1.5%	457.14	1484.00	11.72	82.45	36.59
Jamundí	Queroseno	1.5%	457.14	636.00	12.25	82.19	33.68
Jamundí	Queroseno	1.5%	266.67	1060.00	11.55	80.49	37.47
Briceño	Queroseno	5%	266.67	2756.00	9.74	61.91	61.17
Briceño	Queroseno	5%	457.14	2756.00	9.32	62.44	62.82
Briceño	Queroseno	5%	914.29	2756.00	14.49	64.76	42.24
Briceño	Queroseno	3%	506.67	636.00	10.37	66.40	58.67
Briceño	Queroseno	3%	506.67	1060.00	9.37	68.85	62.62
Briceño	Queroseno	3%	506.67	1484.00	12.80	71.45	48.98
Capitanejo	Queroseno	3%	506.67	636.00	6.65	82.70	25.11
Capitanejo	Queroseno	3%	506.67	1060.00	6.79	77.23	23.56
Capitanejo	Queroseno	3%	506.67	1484.00	7.34	93.38	17.33
Jamundí	Queroseno	3%	506.67	636.00	10.69	80.03	42.13
Jamundí	Queroseno	3%	506.67	1060.00	12.03	79.08	34.88
Jamundí	Queroseno	3%	506.67	1484.00	10.93	81.46	40.82
Capitanejo	Queroseno	3%	506.67	1060.00	7.54	89.65	15.16
Briceño	Queroseno	3%	506.67	1060.00	5.13	62.41	79.56
Jamundí	Queroseno	3%	506.67	1060.00	10.78	79.80	41.67
Capitanejo	Queroseno	3%	506.67	1413.33	7.89	91.47	11.17
Briceño	Queroseno	3%	506.67	1413.33	11.31	66.48	54.92
Jamundí	Queroseno	3%	506.67	1413.33	12.25	77.45	33.68

Localización de la muestra	Colector	Sólidos en pulpa	Concentración Colector, g/ton c	Concentración Espumante, g/ton c	Cenizas final bs, %	Rendimiento másico bs, %	Remoción de cenizas bs, %
Capitanejo	Queroseno	3%	266.67	1060.00	7.36	70.66	17.10
Capitanejo	Queroseno	3%	453.33	1060.00	7.01	90.95	21.13
Capitanejo	Queroseno	3%	906.67	1060.00	7.61	92.24	14.34
Jamundí	Queroseno	3%	266.67	1060.00	10.34	73.05	44.03
Jamundí	Queroseno	3%	453.33	1060.00	10.73	74.60	41.91
Jamundí	Queroseno	3%	906.67	1060.00	12.17	81.11	34.12
Briceño	Queroseno	3%	266.67	1060.00	6.76	62.18	73.05
Briceño	Queroseno	3%	453.33	1060.00	6.97	67.03	72.21
Briceño	Queroseno	3%	906.67	1060.00	12.09	64.12	51.78
Jamundí	Aero Mx 5160	3%	293.33	1060.00	11.16	77.79	39.60
Jamundí	Aero Mx 5160	3%	476.67	1060.00	11.18	75.75	39.47
Jamundí	Aero Mx 5160	3%	916.67	1060.00	11.30	77.90	38.84
Capitanejo	Aero Mx 5160	3%	293.33	1060.00	6.58	62.70	25.95
Capitanejo	Aero Mx 5160	3%	476.67	1060.00	7.66	67.06	13.77
Capitanejo	Aero Mx 5160	3%	916.67	1060.00	7.70	67.53	13.37
Briceño	Aero Mx 5160	3%	293.33	1060.00	6.54	48.57	73.91
Briceño	Aero Mx 5160	3%	476.67	1060.00	8.68	54.94	65.38
Briceño	Aero Mx 5160	3%	916.67	1060.00	10.54	63.72	57.97
Capitanejo	Aero Mx 5160	3%	183.33	1060.00	7.42	57.50	16.52
Briceño	Aero Mx 5160	3%	183.33	1060.00	5.38	33.19	78.53
Briceño	Aero Mx 5160	3%	293.33	848.00	10.02	55.42	60.05
Briceño	Aero Mx 5160	3%	293.33	1484.00	12.93	54.34	48.46
Jamundí	Aero Mx 5160	3%	183.33	1060.00	8.94	63.38	51.64

Localización de la muestra	Colector	Sólidos en pulpa	Concentración Colector, g/ton c	Concentración Espumante, g/ton c	Cenizas final bs, %	Rendimiento másico bs, %	Remoción de cenizas bs, %
Briceño	Aero Mx 5160	3%	293.33	1766.67	14.03	64.01	44.06
Briceño	Aero Mx 5160	3%	293.33	883.33	8.47	45.89	66.21
Briceño	Aero Mx 5160	3%	293.33	1060.00	12.79	50.56	49.00
Jamundí	Aero Mx 5160	3%	293.33	706.67	7.41	44.22	59.91
Jamundí	Aero Mx 5160	3%	293.33	883.33	9.01	61.35	51.24
Jamundí	Aero Mx 5160	3%	293.33	1060.00	9.48	66.68	48.71

**B. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE FLOTACIÓN PARA EVALUAR LOS DOS
COLECTORES Y DOS CONCENTRACIONES DE ESTOS SELECCIONADOS
PREVIAMENTE.**

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas experimentales. Las muestras se etiquetaron con un código que indica, en orden: el tipo de colector utilizado (AERO MX 5160 = M, Queroseno = Q), el origen del carbón (Capitanejo = A, Briceño = C, Jamundí = E), la concentración del colector (baja = L, alta = H) y el número de repetición de la muestra.

Tabla B-1. Pruebas experimentales

Etiqueta	Concentración Colector, g/ton c	Concentración Espumante, g/ton c	Rendimiento másico bs, %	Remoción de cenizas bs, %
M-A-L-1	293.33	1060.00	64.20	18.20
M-A-L-2	293.33	1060.00	53.89	18.08
M-A-H-1	476.67	1060.00	77.64	24.20
M-A-H-2	476.67	1060.00	79.62	24.69
M-C-L-1	293.33	1060.00	46.39	77.36
M-C-L-2	293.33	1060.00	46.77	76.94
M-C-H-1	476.67	1060.00	53.80	70.80
M-C-H-2	476.67	1060.00	49.22	70.89
M-E-L-1	293.33	1060.00	54.09	50.47
M-E-L-2	293.33	1060.00	66.15	49.79
M-E-H-1	476.67	1060.00	64.17	47.23
M-E-H-2	476.67	1060.00	67.52	47.31
Q-A-L-1	266.67	1060.00	53.39	15.01
Q-A-L-2	266.67	1060.00	50.09	14.95
Q-A-H-1	453.33	1060.00	67.66	14.12
Q-A-H-2	453.33	1060.00	58.66	13.23
Q-C-L-1	266.67	1060.00	58.98	82.65
Q-C-L-2	266.67	1060.00	56.53	83.08
Q-C-H-1	453.33	1060.00	40.14	78.03
Q-C-H-2	453.33	1060.00	42.47	77.11
Q-E-L-1	266.67	1060.00	65.81	54.40
Q-E-L-2	266.67	1060.00	68.23	54.04
Q-E-H-1	453.33	1060.00	62.08	50.79
Q-E-H-2	453.33	1060.00	55.91	50.90

C. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ORIGINALES DE CARBÓN.

Tabla C-1. Análisis próximo

Localización Geográfica	Referencia	D1412/D1412M – 20	3173/D3173M – 17a	3175 – 20	3174 – 12	3172-13	3302/D3302M - 19
		Humedad Equilibrio, % p/p	Humedad residual, % p/p	Materia volátil, % p/p	Cenizas, % p/p	Carbono fijo, % p/p	Humedad Total, % p/p
Capitanejo	A	1.82	0.60	10.41	8.83	80.16	4.21
Briceño	C	-	5.23	6.98	23.77	64.02	11.62
Jamundí	E	4.92	1.34	11.98	18.23	68.45	5.84

Tabla C-2. Análisis último, especies de azufre, poder calorífico y mercurio

Localización Geográfica	Referencia	5373-16	5373-16	4239 - 18-e1	2492-02 (07)		5865/D5865M - 19	6722 - 19
		Hidrógeno, % p/p	Nitrógeno, % p/p	Azufre, % p/p	Azufre pirítico, % p/p	Azufre sulfato, % p/p	Poder Calorífico, Btu/lb	Mercurio, ug/kg
Capitanejo	A	3.15	1.48	0.69	0.05	0.01	14033	13
Briceño	C	0.88	0.61	4.15	0.14	0.02	9674	3211
Jamundí	E	3.16	1.42	1.07	-	-	11940	45.00

Tabla C-3. Caracterización de cenizas elementos mayores

Localización Geográfica	FLUORESCENCIA DE RAYOS X - FRX										ANALISIS EN EL CARBÓN		IR
	SiO ₂ , % p/p	TiO ₂ , % p/p	Al ₂ O ₃ , % p/p	Fe ₂ O ₃ , % p/p	MgO, % p/p	CaO, % p/p	Na ₂ O, % p/p	K ₂ O, % p/p	P ₂ O ₅ , % p/p	Mn ₃ O ₄ , % p/p	Cl, ppm	F, ppm	SO ₃ , % p/p
Capitanejo	63.82	1.33	28.67	1.61	0.50	1.23	0.42	0.87	0.986	<0,014	139	58	0.16
Briceño	25.77	0.32	6.59	29.07	1.50	0.42	9.36	1.00	0.100	0.577	<66	61	1.85
Jamundí	38.12	1.20	21.43	7.04	5.17	10.19	2.13	0.64	0.076	0.041	<66	63	14.51

Tabla C-4. Caracterización de cenizas elementos traza

Localización Geográfica	ESPECTROMETRIA DE MASAS CON PLASMA ACOPLADO INDUCTIVAMENTE - ICP-MS								
	Cr, ppm	Mn, ppm	Co, ppm	Ni, ppm	Cu, ppm	Zn, ppm	As, ppm	Sr, ppm	Pb, ppm
Capitanejo	126.8	42.9	23.4	96.7	115.3	208.7	1.4	892	85.5
Briceño	36.3	-	46.0	1286	1138	-	22.5	25	13.3
Jamundí	398	276	36.2	150	224	108	43	416	21.9

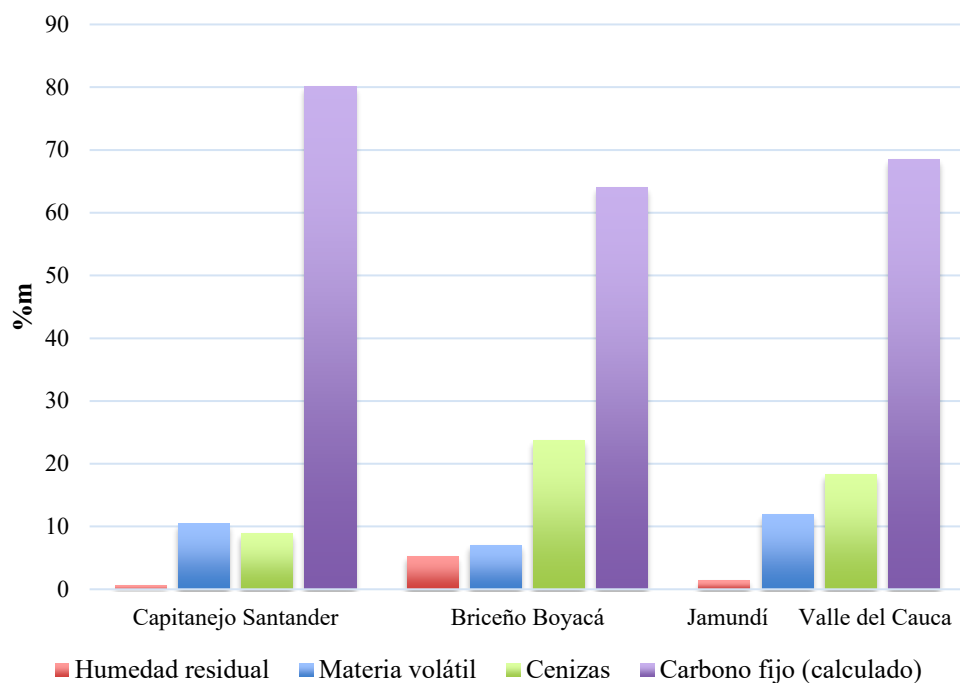


Figura C-1. Análisis próximo las muestras

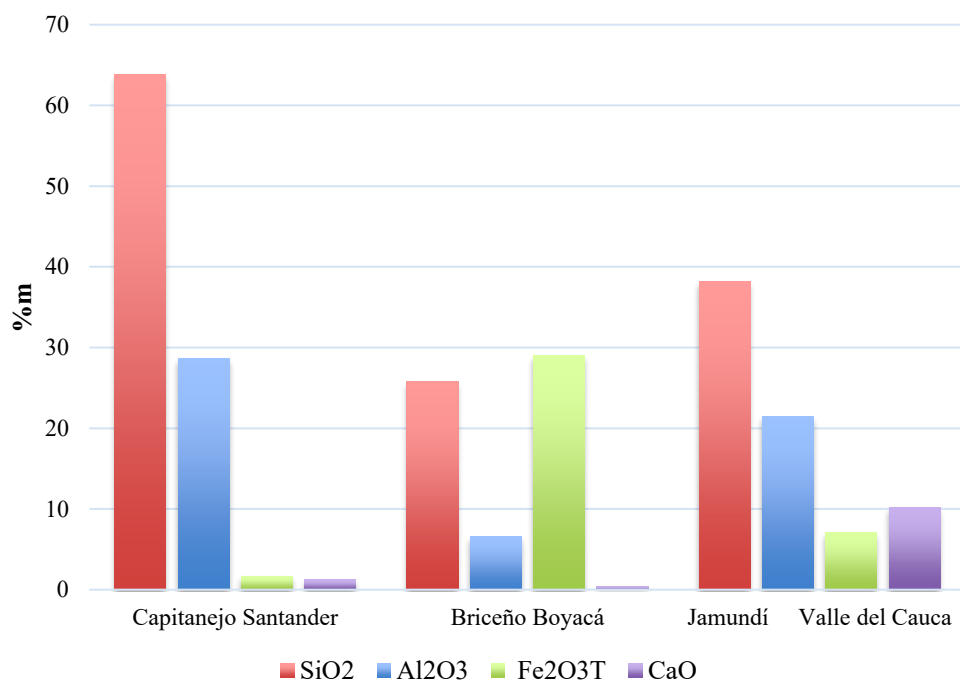


Figura C-2. Composición de cenizas