

**CARBÓN ACTIVADO PARA LA ADSORCIÓN DE ORO DE
SOLUCIONES CIANURADAS A PARTIR DE CARBONES
MINERALES**

KATHERINE JOHANA MORALES CABRERA

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI
2017**

**CARBÓN ACTIVADO PARA LA ADSORCIÓN DE ORO DE
SOLUCIONES CIANURADAS A PARTIR DE CARBONES
MINERALES**

Autor:

KATHERINE JOHANA MORALES CABRERA

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniera Química**

Director

JUAN MANUEL BARRAZA BURGOS

Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D

Co-Directora

KAREN LORENA MARTINEZ MENDOZA

Ingeniera Química

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2017

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado durante el desarrollo de mi carrera, por ser mi apoyo en cada paso que di para llegar hasta aquí. Por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, por darme la claridad necesaria para culminar esta etapa. Y por darme la oportunidad de tener una vida llena de amor al lado de mi familia y amigos.

A mis padres por todo el apoyo que me brindaron, por siempre estar a mi lado y por haberme dado la mejor educación, gracias por la dedicación y el amor que me han dado toda la vida. A mis hermanas Erika y Marcela.

A mi director el profesor Juan Manuel Barraza por creer en mí y haberme dado la posibilidad de desarrollar mi trabajo de grado en Grupo Ciencia y Tecnología del Carbón (GCTC), gracias por todo el apoyo y por la oportunidad de aprender y crecer personal y profesionalmente.

A mi Co-directora la ingeniera Karen Martínez gracias por el apoyo incondicional que me otorgo, por la paciencia y la dedicación durante el desarrollo de mi tesis. Gracias por compartir tus conocimientos y por depositar tu confianza en mí. Pero sobre todo gracias por brindarme tu amistad, este logro es en gran parte gracias a ti.

Agradezco también al grupo de investigación de ciencia y tecnología del carbón (GCTC) por permitirme formar parte de él y por brindarme las herramientas necesarias para realizar este proyecto. A el Laboratorio de Análisis y Procesos de Ingeniería Química y todo su equipo por brindarnos las herramientas necesarias para el análisis de resultados y a el servicio geológico Colombiano por el apoyo logístico.

Agradezco especialmente a Christian Castelblanco, por su amor incondicional y por mostrarme el lado dulce de este camino. Gracias por creer tanto en mí y por estar a mi lado siempre.

Gracias a mis profesores por todas las enseñanzas, a mis compañeros de carrera y amigos, por cada momento compartido y por cada aprendizaje juntos.

RESUMEN

Se prepararon carbones activados por método físico a partir de carbones minerales de tres regiones colombianas, Costa Atlántica, Boyacá y Cundinamarca. El proceso se dividió en cuatro etapas; preparación y caracterización inicial de los carbones minerales, activación (carbonización y activación), caracterización de los carbones activados obtenidos y pruebas de adsorción.

Para el proceso de activación se utilizó un sistema de seis reactores de lecho fijo con distribución de gases. La carbonización se definió como una etapa constante para todas las pruebas a una temperatura de 850°C y un tiempo de residencia de 2 horas y un flujo constante de nitrógeno de 650 mL/min a una presión de salida de 40 psi. La activación se realizó a 2 niveles de temperatura: 700 y 850°C y dos niveles de tiempo de residencia: 1.5 y 2.5 horas, con una entrada de un flujo constante de vapor de agua de 27.46 L/min

La adsorción de oro se realizó con agitación constante a 250 rpm durante 8 horas en una solución artificial de $\text{Au}(\text{CN})_2$ en medio básico de NaOH a un pH de 11.9. La caracterización de los carbones activados se realizó en el equipo ASAP 2020 por adsorción de N_2 y mediante la aplicación de la teoría BET.

El carbón de Cundinamarca presentó las mejores características físicas de carbono fijo (52,33%), cenizas (4,08%) y materia volátil (39,64%) con respecto a los carbones de Costa atlántica y Cerrejón.

El mejor número de yodo obtenido (919 mg I_2/g) se produjo a partir de carbón de Cundinamarca a una temperatura de activación de 850°C y un tiempo de residencia de 2.5 horas. Sin embargo el carbón activado que presentó la mayor capacidad de carga de oro (9.74 mg Au/ g CS) se produjo a partir de carbón de Cundinamarca a una temperatura de 850°C y un tiempo de residencia de 1.5 horas.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
1. MARCO TEÓRICO	6
1.1. MARCO CONCEPTUAL.....	6
1.1.1. Carbón mineral.....	6
1.1.2. Carbón activado	6
1.1.3. Precursores del carbón activado.....	8
1.1.4. Métodos para la producción de carbón activado.....	8
1.1.5. Adsorción	9
1.2. ANTECEDENTES.....	12
1.2.1. Carbón activado en la adsorción de oro.	12
1.2.2. Carbón activado producido a partir de carbones colombianos	13
1.2.3. Carbones colombianos potenciales para producción del carbón activado usado en procesos de adsorción de oro de soluciones cianuradas..	14
2. METODOLOGÍA.....	15
2.1. ADECUACIÓN DEL CARBÓN	15
2.2. CARACTERIZACIÓN INICIAL DE CARBONES	15
2.3. PRUEBAS PRELIMINARES.....	15
2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL	16
2.5. EQUIPOS.....	17
2.6. ENSAYOS EXPERIMENTALES	19
2.7. PRUEBAS DE ADSORCIÓN DE ORO	20
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
3.1. CARACTERIZACIÓN DE CARBONES MINERALES	22

3.1.1. Análisis próximo y último.....	22
3.2. CARACTERIZACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS	23
3.3. RENDIMIENTO DE LOS CARBONES ACTIVADOS.....	24
3.4. ANÁLISIS DEL NÚMERO DE YODO.....	26
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	29
3.5.1. Efecto de las variables sobre el número de yodo	30
3.5.2. Efecto de las variables sobre el rendimiento.....	32
3.6. ANÁLISIS DE ÁREA SUPERFICIAL	34
3.7. PRUEBAS DE ADSORCIÓN DE ORO	35
4. CONCLUSIONES	38
5. RECOMENDACIONES.....	39
6. REFERENCIAS.....	40
ANEXO 1. PLANOS SISTEMA DE REACTORES	43
ANEXO 2. DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBAS DE ADSORCION DE ORO.	46

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura cristalina. a) Diamante (cubica). b) Grafito (hexagonal). c) Carbón Activado (no cristalina).....	7
Figura 2 Tipos de adsorción, clasificación IUPAC.....	10
Figura 3 Montaje del sistema de producción de vapor	16
Figura 4 Molino de discos.....	18
Figura 5 Mufla	18
Figura 6 Equipo de absorción atómica.....	19
Figura 7 Efecto de la Temperatura de activación y Tipo de carbón sobre porcentaje de rendimiento b.s.l.c.....	25
Figura 8 Efecto del tiempo de residencia y tipo de carbón sobre el porcentaje de rendimiento b.s.l.c.....	26
Figura 9 Efecto de la Temperatura y tipo de carbón sobre el número de yodo	27
Figura 10 Efecto del tiempo de residencia y el tipo de carbón sobre el número de yodo.....	28
Figura 11 Efectos principales sobre el número de yodo	31
Figura 12 Efectos principales sobre el Rendimiento.....	33
Figura 13 Isoterma de adsorción de oro sobre C-850-2.5.....	47
Figura 14 Isoterma de adsorción de oro sobre C-850-1.5.....	47
Figura 15 Isoterma de adsorción de oro sobre B-850-2.5.....	47
Figura 16 Isoterma de adsorción de oro sobre B-700-1.5.....	48
Figura 17 Isoterma de adsorción de oro sobre B-700-2.5.....	48
Figura 18 Isoterma de adsorción de oro sobre CA-700-2.5	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Carbones colombianos seleccionados como potenciales para producción de carbón activado.....	14
Tabla 2 Equipos usados durante el desarrollo del proyecto	17
Tabla 3 Análisis próximo del carbón mineral utilizado como materia prima.....	22
Tabla 4 Análisis último del carbón mineral utilizado como materia prima	23
Tabla 5 Caracterización de carbones activados producidos.....	23
Tabla 6 Numero de yodo para los carbones activados producidos	26
Tabla 7 Análisis de varianza del número de yodo	30
Tabla 8 Análisis de varianza para el contenido de carbono fijo inicial sobre el número de yodo.....	32
Tabla 9 Análisis de varianza para el rendimiento	33
Tabla 10 de varianza para el contenido de carbono fijo inicial sobre el número de yodo.....	34
Tabla 11 Análisis de área, volumen y tamaño de poro (Modelo BET).....	35
Tabla 12 Capacidad de adsorción de Oro	36
Tabla 13 Datos regresión no lineal isoterma de Freundlich.....	46

INTRODUCCIÓN

La explotación minera de carbón en Colombia se centra en dos actividades: la extracción y comercialización. Aproximadamente el 90% de la reservas de carbón se encuentran en los departamentos de la Guajira y el Cesar, estas reservas se caracterizan por tener bajas concentraciones de ceniza y azufre, es decir, alta calidad. Debido a ello, la explotación de otras regiones carboníferas que cuentan con importantes reservas del mineral es reducida. A pesar de la riqueza carbonífera del país, la gran mayoría el carbón explotado se exporta y éste regresa convertido en productos como carbón activado (CA) o coque a precios elevados. El aprovechamiento de carbón mineral colombiano en procesos que permitan su transformación en productos derivados de mayor valor agregado sería un beneficio al desarrollo económico y tecnológico del país que actualmente importa dichos productos terminados como carbón activado y coque.

El proceso de *Carbon in pulp* (CIP), utiliza carbón activado para la adsorción de oro de soluciones cianuradas provenientes de la extracción de oro. El proceso de producción del carbón activado utilizado en el proceso CIP no ha sido ampliamente estudiado en Colombia debido a los altos costos de la operación durante las etapas de desorción/elución y regeneración térmica del carbón activado. Una alternativa para impulsar su investigación es plantear el uso de carbón mineral colombiano para la producción de carbón activado para su uso en la adsorción de oro de soluciones cianuradas. En este trabajo se evaluó el uso de carbón mineral de las regiones Costa atlántica (Cerrejón), Cundinamarca y Boyacá como materia prima para la producción de carbón activado a emplearse en la adsorción de oro disuelto en soluciones cianuradas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. MARCO CONCEPTUAL

1.1.1. Carbón mineral

Es un mineral de origen orgánico, compuesto principalmente por carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre. Es el resultado de acumulación y enterramiento vegetal que mediante transformaciones químicas y físicas se convierte en carbón mineral. El carbón se puede clasificar por medio de métodos termogravimétricos cuantificando su contenido de carbón fijo, humedad, material volátil, poder calorífico y ceniza. Una manera de clasificar el tipo de carbón es el rango, que tiene en cuenta el contenido de carbono o el porcentaje de volátiles, el cual nos designa el estado de carbonificación alcanzado que ha sufrido la materia orgánica original. De acuerdo al rango se clasifican cuatro tipos de carbón: lignitos, carbones sub-bituminosos, carbones bituminosos y antracitas; en orden creciente de contenido de Carbono y decreciente de volátiles (Ministerio de minas y energía, 2012).

Colombia es el país con mayor producción de carbón mineral en América Latina; tiene carbón térmico en el norte, cerca del mar Caribe, y carbón coquizable en la región central. Cuenta con reservas medidas de 6.508 Mt distribuidas en las tres cordilleras: Oriental, Central y Occidental. El 95% de las reservas se ubica en los departamentos de La Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca. (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2012).

1.1.2. Carbón activado

El carbón activado es un material manufacturado que posee un elevado grado de porosidad y una alta área superficial interna (desde 500 hasta 1500 m²/g). La producción de este tipo de material se lleva a cabo a través de procesos de activación física o química a partir de una gran variedad de materias primas carbonáceas. Actualmente, el carbón activado se utiliza en procesos para la purificación de agua potable, recuperación de disolventes, purificación de gases,

recuperación de oro, tratamiento de aguas residuales y catálisis, entre otros (Goyes et al 2013).

Los carbones activados pertenecen al grupo de materiales carbonosos que se caracterizan por presentar una estructura cristalina reticular en forma de red, la cual llega a ser similar a la del grafito. La estructura del carbón activado está compuesta por láminas que están organizadas de manera irregular y aleatoria, las cuales constituyen los poros. Esta estructura se conoce como turbostrática y se define por ser más desordenada que el grafito como se puede observar en la Figura 1, esta posee distancias planos superiores que permiten el acceso a los microporos de moléculas de mayor tamaño (Ovín Ania, 2003), estos microcristales pueden tener tamaños entre 1-10 nm.

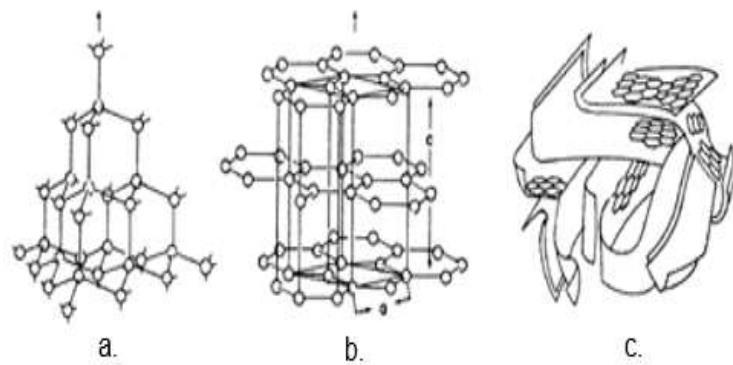


Figura 1 Estructura cristalina. a) Diamante (cúbica). b) Grafito (hexagonal). c) Carbón Activado (no cristalina)

Fuente: Ovín Ania, (2003)

Los poros de un carbón activado se clasifican según la IUPAC (Internacional Union of Pure and Applied Chemistry) en tres tipos:

- **Microporos:** (diámetro menor que 2 nm) Aportan una alta área superficial interna y son responsables en gran medida de la capacidad de adsorción.
- **Mesoporos:** (diámetro entre 2 nm y 50 nm) Se comportan como canales para el transporte del adsorbato o sustancia adsorbida por el carbón activado, hacia los microporos.
- **Macroporo:** (diámetro mayor que 50 nm) Son los poros de mayor tamaño y su principal función es servir como vía para el transporte de las moléculas del adsorbato desde la superficie hacia el interior de las partículas.

1.1.3. Precursores del carbón activado

El carbón activado es un material adsorbente obtenido a partir de materiales carbonosos, razón por la cual puede prepararse a partir de una gran cantidad de materias primas como la madera, los lignitos, turba, los carbones minerales y subproductos agrícolas, entre otros. Las características de la materia prima así como las condiciones de activación pueden variar el resultado final del área superficial y el tamaño de poro de los carbones activados (Benabithe, et al., 2005) razón por la cual es importante tener en cuenta las características del material precursor.

Una materia prima viable para la producción de carbón activado se debe caracterizar por tener un bajo contenido de materia inorgánica, larga vida de almacenamiento, bajo costo, ser resistente como para mantener sus propiedades en condiciones de uso y debe ser capaz de generar un producto activado de alta calidad (Bah, 2012).

1.1.4. Métodos para la producción de carbón activado

La activación de carbón se realiza principalmente mediante dos métodos: La activación física y la activación química. En ambos métodos se busca eliminar la humedad y la materia volátil de la materia prima para transformar el material carbonoso en un material altamente adsorbente con una estructura porosa.

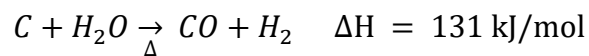
• Activación física

Se realiza en dos pasos, primero se lleva a cabo una carbonización la cual se efectúa en un horno a temperaturas entre 700 y 1100°C (Benabithe et al., 2005) en una atmósfera inerte de oxígeno para eliminar la materia volátil y así obtener un producto de alto contenido en carbono con una ligera porosidad que se desarrollara durante la activación.

El segundo paso es la activación, la cual se realiza para incrementar la porosidad del material usando un agente oxidante (CO₂, vapor de agua, aire, etc.). En este proceso se eliminan los posibles alquitranes que tienden a formarse en la estructura durante la etapa de carbonización debido a las temperaturas en que esta

se realiza. Con lo cual se consigue desarrollar la porosidad característica del carbón activado e incrementar su área superficial.

Cuando se realiza la activación usando vapor de agua se consigue inicialmente abrir los poros obstruidos en el carbonizado y se desarrollan los microporos. Luego sigue la ampliación de estos microporos lo cual lleva a una formación de meso y macroporosidad del carbón activado (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 1997). La reacción principal entre el carbono y el vapor de agua presenta comportamiento endotérmico tal como se indica a continuación:



- **Activación química:**

Consiste inicialmente en deshidratar la materia prima mediante la adición de un agente químico (ácido fosfórico, cloruro de zinc, etc.), para después someterlo a un proceso de carbonización a través del cual se obtiene la estructura porosa del carbón activado. Posteriormente este carbonizado se lava para eliminar restos del químico (Benabith et al., 2005).

1.1.5. Adsorción

Una de las características principales de los carbones activados es su capacidad de adsorción. Se puede definir la adsorción como el aumento de la concentración de alguno de los componentes de la fase gaseosa o líquida (adsorbato) sobre la superficie de un sólido (adsorbente) (Bah, 2012). La adsorción se debe a dos fuerzas una de atracción hacia la superficie del sólido y otra de repulsión. El equilibrio se alcanza cuando las tasas de adsorción y desorción se igualan, momento en el que se agota la capacidad de adsorción del carbón.

- **Tipos de adsorción**

Existen dos tipos de adsorción: la fisisorción y la quimisorción. La diferencia fundamental entre ambas radica en que durante la fisisorción la especie adsorbida conserva su naturaleza química, mientras que durante la quimisorción, ésta sufre una transformación para dar lugar a una especie distinta, es decir, no conserva su estructura (Martínez, 2013).

En la **fisisorción** el adsorbato se adsorbe formando capas sucesivas, este fenómeno se conoce como adsorción multicapa. En la fisisorción, las moléculas de soluto se unen a la superficie del sólido por las fuerzas de Van der Waals, lo cual permite que el adsorbato conserve su identidad (Martínez, 2013).

Durante la **quimisorción**, la adsorción queda restringida a monocapa debido al enlace químico que existe entre la superficie del adsorbente y el adsorbato. Las moléculas de soluto permanecen unidas a la superficie del sólido por enlaces químicos fuertes de corto alcance (Martínez, 2013), por lo que la molécula adsorbida no conserva su estructura química inicial. (Vega, 2010).

• Isotermas de adsorción

La relación, a temperatura constante, entre la cantidad de una sustancia adsorbida por un adsorbente y la concentración de equilibrio se conoce como *isoterma de adsorción* y su patrón suministra información acerca de la forma, área y polaridad del adsorbente (Rodríguez-Reinoso, 2010). Los modelos matemáticos frecuentemente empleados para el tratamiento de datos experimentales son las desarrolladas por Freundlich, Langmuir, y por Brunauer, Emmet y Teller (Isoterma BET). Existen seis tipos de isotermas de adsorción definidos por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). En la Figura 2 se observan las formas más usuales que pueden adoptar las isotermas. El punto B indica la presión relativa a la cual se forma una monocapa.

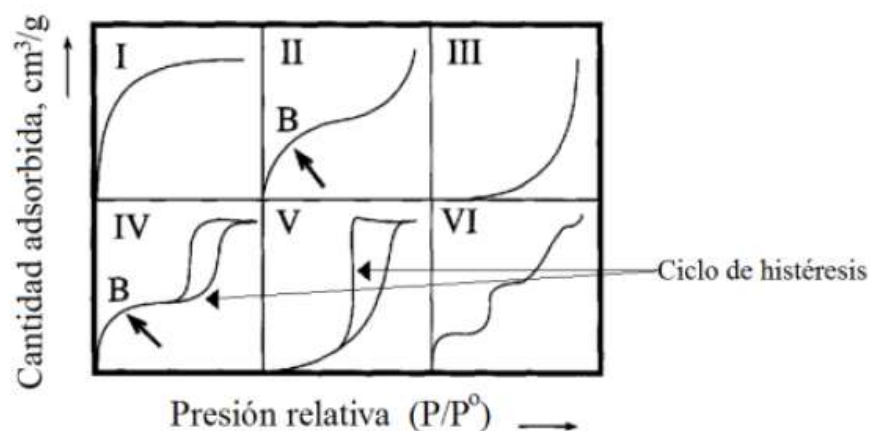


Figura 2 Tipos de adsorción, clasificación IUPAC

Fuente: (H Marsh & Rodriguez, 2000)

La isoterma *tipo I* se caracterizan porque la adsorción se produce en sólidos microporosos como carbones activados, zeolitas, etc., a presiones relativas bajas debido a la proximidad de las paredes del poro. Este isoterma es característica de un proceso de quimisorción. La isoterma *tipo II* corresponde a una adsorción física de sólidos meso y macroporosos, se caracteriza por la formación inicial de la monocapa adsorbida y la formación posterior de la multicapa a medida que aumenta la presión. La isoterma *tipo III* sucede cuando la interacción entre el adsorbato-adsorbente es muy débil y no se puede definir el punto B. La *tipo IV* es característica de materiales mesoporosos, corresponde a una adsorción en multicapa. La isoterma *tipo V* presenta interacciones débiles entre el adsorbato-adsorbente a presiones bajas. La isoterma *tipo VI* se encuentra en sólidos en los que la adsorción tiene lugar capa a capa porque la superficie es muy homogénea (H Marsh & Rodriguez, 2000).

• **Isoterma de Freundlich**

Para calcular la capacidad de adsorción de los carbones activados se utilizó la isoterma de Freundlich. Esta isoterma permite medir la capacidad de adsorción de los carbones por medio del K-valor, el cual hace referencia a una constante definida en la ecuación de Freundlich

En el caso de adsorción en soluciones líquidas la ecuación de Freundlich se define como $X/M = KC^{1/n}$, donde C es la concentración de adsorbato en equilibrio en la solución, X es la masa de adsorbato cargada en mg, M es el peso del adsorbente y K es la constante definida como la carga máxima del adsorbato en equilibrio con la solución a una concentración de 1 ppm.

• **Adsorción de oro**

La adsorción de dicianuro de oro en el carbón activado ha sido ampliamente estudiada por muchos autores, y en general se concuerda que se no existe un mecanismo definido de adsorción de oro sobre el carbón activado. Sin embargo diversos autores han publicado que el dicianuro de oro es adsorbido sin ningún cambio químico desde soluciones alcalinas dentro del carbón activado por medio del mecanismo de par iónico (Navarro & Vargas, 2010).

Este mecanismo inicia una etapa de adsorción, que involucra la adsorción de un par iónico, donde Mn^{+} es un ión metálico que tiene una solubilidad más baja que el $Au(CN)^{-}_2$ en el medio de adsorción, seguida por una etapa de reducción, en la cual se forman especies el tipo $Au(CN)_x$ en la superficie del carbón. Este mecanismo describe la adsorción de aurocianuro sin cambio químico (McDougall et al. 1980).

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. Carbón activado en la adsorción de oro.

Davidson et al (1979), recuperaron oro y plata a partir de una solución acidificada. Utilizaron carbón activado granular de cascara de coco (área superficial aproximada: 1200 m²/g) en un arreglo de tres columnas de adsorción. Obtuvieron una recuperación de oro y plata mayor al 98% e identificaron que un pH ácido entre 4 y 5 favorece el proceso de extracción y evita el ensuciamiento del carbón por presencia de Ca.

Jia et al (1998), usaron carbones activados provenientes de hueso y carbón mineral (área superficial aproximada entre 700-1400m²/g) para estudiar el mecanismo de adsorción de oro y plata. Encontraron que la capacidad de adsorción de oro y plata aumenta con el incremento del volumen de la porosidad de los carbones activados. La capacidad de adsorción fue mayor para los carbones activados a partir de carbón mineral, cualidad que se le atribuyó a la distribución de tamaño de poro que presenta el material (mayor cantidad de mesoporos y macroporos).

Seke et al (2000) Utilizaron tres carbones activados, dos de ellos procedentes de cascara de coco y uno de carbón mineral. Estos fueron sometidos a un tratamiento térmico con N₂ a 850°C en la adsorción de oro y fueron comparados con carbones sin dicho tratamiento. Encontraron que no se producen cambios significativos en el volumen de los poros con el tratamiento térmico. Además que el tamaño del poro debe ser superior a 0.4 cm³/g para que se produzca la adsorción de oro en los mesoporos.

Navarro y Vargas (2010) Estudiaron la adsorción de oro en carbón activado a partir de soluciones cianuradas. Usaron dos tipos de CA a partir de cascara de coco con Área superficial: $985\text{m}^2/\text{g}$ y $786\text{m}^2/\text{g}$ (diámetro de poro 3.8 nm y 11.6 nm respectivamente). La adsorción se llevó a cabo en un reactor con agitación mecánica a temperatura constante durante 6 horas. Al aumentar el diámetro de poro y los macroporos, encontraron que aumenta la carga de oro por superficie de carbón activado y que la presencia de cationes (como Ca^{+2} , Mg^{+2}) favorece el proceso de adsorción de oro en medio cianuro

1.2.2. Carbón activado producido a partir de carbones colombianos

Rincón (2002) realizó la activación física de CA a partir de carbón del Cerrejón. Las condiciones de operación de la carbonización fueron: $10^\circ\text{C}/\text{min}$ como razón de calentamiento hasta 700 y 900°C , en una atmósfera inerte de N_2 . En el proceso de activación de carbón se usó como gas de activación vapor de agua también entre 700 y 900°C , con un tiempo de residencia entre 1 y 3 horas. Encontró que las mejores condiciones de operación para producir CA son: 3 horas de tiempo de residencia y 900°C como temperatura de activación.

Benabith et al., (2005) realizaron la activación de un carbón mineral sub-bituminoso proveniente de la región de Amagá (Antioquia), el cual contenía 5.18% de cenizas, 39.94% de material volátil, 46.3% de carbono fijo y una humedad del 10.45%. El proceso de activación se realizó en reactores de lecho fluidizado por proceso autotérmico. Se obtuvieron carbones activados con áreas superficiales entre 460 y $490\text{ m}^2/\text{g}$.

Goyes et al (2013) produjeron carbón activado de un carbón mineral tipo ripio originario del suroeste Antioqueño. La activación se realizó en un horno tubular horizontal y atmósfera inerte. El tiempo de residencia durante la etapa de carbonización fue entre 60 y 90 minutos, se usó como atmósfera inerte N_2 a 900°C . Para la etapa de activación se utilizaron tres temperaturas, (800, 850 y 900°C) y se usó vapor de agua como gas de activación. Se obtuvieron carbones activados de $660\text{ m}^2/\text{g}$ de área superficial aproximadamente. Concluyeron que la temperatura de activación es el factor más importante del proceso.

1.2.3. Carbones colombianos potenciales para producción del carbón activado usado en procesos de adsorción de oro de soluciones cianuradas

Al realizar la activación de un carbón mineral se deben tener en cuenta ciertas características del material precursor las cuales permitan el desarrollo de áreas superficiales específicas internas entre 600 y 900 m²/g con mayor contenido de macro y mesoporos. La porosidad de un carbón activado se forma en la etapa de activación dependiendo de la fluidez de la materia prima, la cual está relacionada con el rango del carbón, es decir, su contenido de materia volátil y carbono fijo. Una baja fluidez de la matriz carbonosa afectará la capacidad de mover o estirar las capas de anillos de carbono que componen el material precursor durante la des-volatilización. Razón por la que el tamaño de poro que se genera durante la etapa de pirolisis está directamente relacionado con la distribución de materia volátil y carbono fijo (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

Estas características iniciales corresponden a carbones tipo bituminoso y sub-bituminosos los cuales tienen un contenido de materia volátil entre el 35 y 40% y de carbón fijo entre 40 y 50%. De acuerdo con esto, en la Tabla 1 se refieren las zonas geográficas que fueron seleccionados para el desarrollo de este trabajo.

Tabla 1 Carbones colombianos seleccionados como potenciales para producción de carbón activado

Zona carbonífera	Detalles		Características		
	Área	Sector	Ceniza (%)	Materia volátil (%)	Carbono fijo (%)
Costa Atlántica	Cerrejón	Zona norte, central y sur	6.94	35.92	45.20
	Cesar	El Boquerón, El descanso sur	5.61	36.79	47.31
	Jerusalén-Guataquí	-	5.34	39.09	50.38
Cundinamarca	Guatavita-Sesquilé-Chocontá	Suesca-Chocotá, Guatavita	11.23	34.88	51.91
Boyacá	Tunja-Paipa-Duitama	-	11.40	38.03	41.09
	Úmbita-Laguna de Tota	-	13.10	38.34	42.80

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2012)

2. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la secuencia experimental en la que se desarrolló la producción de los carbones activados; desde el muestreo, adecuación, caracterización, carbonización y activación de los carbones minerales y posteriormente las pruebas de adsorción de yodo, oro y la caracterización final de los carbones activados.

2.1. ADECUACIÓN DEL CARBÓN

Se seleccionaron carbones de tres diferentes regiones carboníferas colombianas: Cerrejón, Cundinamarca y Boyacá. Con el fin de obtener una muestra representativa de cada región se realizó un cuarteo sucesivo a partir de una muestra inicial de aproximadamente 15 kg para obtener una fracción de 5 kg, a los cuales se les realizó una molienda en un molino de discos y una separación en una serie de tamices en mesa vibratoria para adecuar 2 kg de muestra a un tamaño de partícula de pasante malla 60 (serie de tamices de Taylor).

2.2. CARACTERIZACIÓN INICIAL DE CARBONES

A cada una de las muestras de carbón se le realizó un análisis próximo y último según las normas ASTM números D3172 (ASTM, 2013), D3173 (ASTM, 2011), D3174 (ASTM, 2012) y D3175 (ASTM, 2011), para determinar las características iniciales de los carbones minerales.

2.3. PRUEBAS PRELIMINARES

Durante las pruebas preliminares se adecuó y probó el montaje del sistema de producción de vapor para garantizar un flujo adecuado de vapor durante la etapa de activación. El montaje consiste en un Erlenmeyer de 1 L sobre una estufa de temperatura graduable, conectado a un tanque de alimentación de agua que funciona como control del nivel. A su vez, cuenta con una salida de vapor aislada que se acopla directamente con sistema de distribución de vapor y reactores por medio de un orificio en la puerta de la mufla.

El montaje para la producción de vapor puede observarse en la Figura 3



Figura 3 Montaje del sistema de producción de vapor

2.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

La etapa de carbonización se estableció como una constante para todas las pruebas con los siguientes valores de las variables: temperatura de 850°C, tiempo de residencia 2 h; de las cuales 1h 25 min pertenecen a la rampa de calentamiento (10°C/min) y el tamaño de partícula del carbón mineral en pasante malla 60 de la serie de tamices Taylor (<250 μm).

Para el diseño experimental se definieron como factores la región de procedencia del carbón, la temperatura y el tiempo de la etapa de activación. Para cada región se usó un diseño experimental 2^2 sin replica con una corrida central de control con tres repeticiones para hacer una estimación del error experimental. En total se realizaron 7 ensayos experimentales por cada región carbonífera. Como variable de respuesta se definieron el número de yodo de cada carbón activado y el rendimiento másico en base seca libre de ceniza. Esta variable es una medida de la microporosidad de los carbones activados y se puede utilizar para descartar los carbones que poseen mayor contenido de microporos y que no resultan apropiados para la adsorción de oro (Yalcin & Arol, 2002) (Soleimani & Kaghazchi, 2008). Los números de yodo se evaluaron siguiendo la norma ASTM D4607 (ASTM, 2014).

En total se produjeron 21 muestras de carbón activado a las cuales se les realizó un análisis próximo de acuerdo a las normas ASTM D2866 (ASTM, 2011), D2867 (ASTM, 2014) y D5832 (ASTM, 2014) para determinar el contenido de

humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo (por diferencia), medición de número de yodo, pruebas de adsorción de oro para los tres valores más altos y los tres más bajos de número de yodo y medición de área superficial para los carbones con los tres valores más altos de número de yodo.

2.5. EQUIPOS

Equipos

En la Tabla 2 se detallan los equipos usados para el desarrollo del presente trabajo, donde se muestra: marca, referencia y características.

Tabla 2 Equipos usados durante el desarrollo del proyecto

EQUIPO	MARCA	REFERENCIA	CARACTERISTICAS
Molino de discos	MSI industries, inc	Massco pulverizer	Molino de discos utilizado para moler las muestras iniciales de carbón mineral
Balanza analítica	Oahus	PA214	Capacidad máx. 210g y desviación de $\pm 0,0001g$
Mufla	Industrias Terrigeno	D8	Temperatura máx. 1200 °C, peso 60 Kg, control automático programable con funciones PID, 8 rampas de calentamiento programables, 220 V
Sistema de Reactores	Diseño	-	Materiales cerámica y acero Inoxidable. Resistente a altas temperaturas, una entrada y salida de gases. Capacidad máx. 120 g
Horno de secado	Memmet	BE300	Voltaje: 230V. Rango de temperatura: 30-250 °C
ASAP 2020	Micrometrics	ASAP 2020	Medidas de área superficial exacta y precisa. Integra múltiples técnicas de adsorción de gases.
AA Spectrometer	Thermo Scientific	iCE 3300 Series	Espectrómetro de absorción atómica, cuenta con atomizador individual, caja de gases

A continuación se detallan los equipos más relevantes y su uso durante este trabajo.

- **Molino de discos:** El tamaño de partícula deseado para el carbón mineral inicial se obtuvo mediante molienda usando el molino que aparece en la Figura 4.



Figura 4 Molino de discos

- **Mufla:** Horno eléctrico con temperatura hasta 1200°C, esta posee resistencias en espiral las cuales se encuentran ubicadas en las paredes del equipo y un aislamiento en ladrillo. Cuenta con una termocupla tipo K recubierta en material cerámico y controles de temperatura programables. Además tiene una abertura en la parte superior para permitir la salida de gases. La mufla se utilizó en conjunto con el sistema de reactores de cerámica para la producción de los carbones activados. En la Figura 5 se muestra el equipo utilizado.



Figura 5 Mufla

- **Sistema de reactores:** Sistema de seis reactores cerámicos de lecho fijo, posee una base en acero inoxidable que cuenta con entrada y salida de gases, en el fondo de los reactores se ubican mallas en acero inoxidable para permitir el flujo de gases (en este caso nitrógeno o vapor de agua) por el lecho. Los reactores se pueden desacoplar de la base para permitir un retiro total de las muestras y una fácil limpieza. ver planos en el Anexo 1.
- **AA spectrometer:** Este equipo fue utilizado para medir mediante absorción atómica la concentración de oro en diferentes soluciones. Resultados con los cuales se calculó el porcentaje de adsorción de los carbones activados. En la Figura 6 se puede observar el equipo usado.



Figura 6 Equipo de absorción atómica

2.6. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los carbones activados fueron preparados en dos etapas, una de carbonización y otra de activación. Durante la etapa de carbonización se mantuvieron constantes la temperatura (850°C), el tiempo de residencia (2 h) y el tamaño de partícula (<250 μm), en un medio inerte de nitrógeno gaseoso. El flujo de nitrógeno se mantuvo constante en 650 mL/min a 40 psi de presión de salida. Los valores de temperatura y tiempo de residencia se seleccionaron teniendo en cuenta los trabajos de autores como Goyes et al. (2013) y Rincón et al., (2015) quienes reportaron haber obtenido carbonizados libres de materia volátil y sin combustión del carbono fijo bajo condiciones similares.

Para la etapa de activación se usaron 2 temperaturas de activación (700 y 850°C) y 2 tiempos de residencia (1.5 y 2.5 h). Como agente activante se utilizó vapor de agua con un flujo de 27.46 L/min. Se seleccionó vapor de agua debido a que este agente favorece la formación de macroporos en el carbón activado, lo que resulta adecuado para la adsorción de oro debido al tamaño de partícula. Los puntos centrales del diseño se fueron tomados con un valor de temperatura de 775°C y tiempo de residencia de 2 horas, se realizaron tres repeticiones.

Los carbones activados fueron producidos en una mufla de calentamiento con una adaptación de reactores cerámicos con capacidad de 120 g de carbón mineral y un sistema de distribución de gases de acero inoxidable (Ver diseño en Anexo 1). Las dos etapas que se requerían para la producción se realizaron en simultáneo.

Se determinó el número de yodo siguiendo la norma ASTM D4607-14 para cada uno de los carbones activados producidos. Las 21 muestras de carbón activado se sometieron además a un análisis próximo siguiendo las normas ASTM D2866 (ASTM, 2011), D2867 (ASTM, 2014) y D5832 (ASTM, 2014) para determinar el contenido de humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo (calculado por diferencia).

2.7. PRUEBAS DE ADSORCIÓN DE ORO

Con el objetivo de estudiar la carga máxima de oro adsorbido sobre la superficie de del carbón, es decir, en el equilibrio, se seleccionaron los tres carbones activados con mayor número de yodo y los tres con menos número de yodo. El valor K es la constante de equilibrio propuesta por el modelo de isoterma de adsorción de Freundlich. En este caso, El valor de K es una medida de la carga de carbón en el equilibrio y se utilizó para comparar la capacidad de adsorción de los carbones activados producidos con los valores de K de carbones comerciales. Generalmente, los carbones activados utilizados en plantas CIP y CIL tienen K-valores >30 Kg Au/ton (Urbanic, Julia, & Faulkner, 1983).

A los carbones seleccionados se les realizaron pruebas de adsorción utilizando ocho soluciones a diferentes concentraciones de Au(CN)₂ 5, 10, 15, 25, 35, 50, 75 y 100 ppm. Las pruebas consistieron en adicionar 50 mL de la solución artificial de Au(CN)₂ en medio básico de NaOH (pH de 11.9) a 0.0500 g ±1mg del carbón activado. Se mantuvo una agitación constante a 250 rpm durante 8 horas, tiempo en el que se alcanza un pseudo-equilibrio y el carbón alcanza su carga máxima de oro. Las soluciones finales fueron analizadas por medio de absorción atómica en el LAPIQ¹. La carga final en el carbón activado X/M fue calculada a través de la diferencia entre la concentración inicial C_{sin} y la concentración final C_{sfin} , dividida por el peso del carbón activado así:

$$X/M \left[\frac{mg \text{ Au}}{g \text{ CS}} \right] = \frac{(C_{sin} - C_{sfin}) \left[mg \frac{Au}{L} \right] * \frac{50 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}}}{M_{carbón} [g]}$$

¹ Laboratorio de Análisis y Procesos de Ingeniería Química. Edif. 336. Universidad del Valle, Sede Meléndez Tel. (57) (2) 3212100 Ext: 7028

Los datos de X/M se grafican contra la concentración final en el equilibrio C_{eq} y se ajustaron al modelo de la isoterma de Freundlich utilizando el método de mínimos cuadrados para encontrar el valor de la constante K , que define la carga máxima del carbón cuando la concentración en el equilibrio alcanza el valor de 1 ppm.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE CARBONES MINERALES

3.1.1. Análisis próximo y último

Los carbones minerales fueron caracterizados por análisis próximo y último de acuerdo a los estándares de las normas ASTM, como se puede observar en la Tabla 3 y la

Tabla 4. El mayor porcentaje de materia volátil y carbono fijo (calculado) se registró para el carbón proveniente de Cundinamarca con un porcentaje en base seca de 39.64% y 52.33% respectivamente. Estos resultados ubican a los carbones usados en este trabajo dentro del rango de carbones bituminosos.

En la Tabla 3 se puede observar que el carbón de Cundinamarca posee el mayor porcentaje de materia volátil y humedad, por lo cual esté podría desarrollar una mayor área superficial que los carbones de Boyacá y Costa Atlántica. Esto se debe a que durante la etapa de carbonización ocurre una pérdida de la humedad y una liberación del material volátil y es allí donde se forma la estructura porosa inicial en el material.

Tabla 3 Análisis próximo del carbón mineral utilizado como materia prima

CARBÓN MINERAL	Humedad b.h. [%]	Materia volátil b.s. [%]	Cenizas b.s. [%]	Carbono fijo b.s.*[%]
BOYACÁ	1.89	36.89	18.10	45.01
COSTA ATLANTICA	5.14	30.50	27.97	41.53
CUNDINAMARCA	3.95	39.64	4.08	52.33

b.h.: base húmeda; b.s: base seca; *calculado

Los carbones se clasificaron de acuerdo su rango siguiendo la norma ASTM D388 (ASTM, 2017). El carbón de Costa atlántica es bituminoso alto en volátiles C no aglomerante, el carbón de Boyacá es bituminoso alto en volátiles A aglomerante y el carbón de Cundinamarca es bituminoso alto en volátiles B comúnmente

aglomerante, estas características garantizan que las propiedades del material precursor produzcan carbones activados con características adecuadas para la adsorción de oro.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la composición en C, H, N, S y O (calculado), el mayor contenido de carbono fijo se presentó para el carbón de la región de Cundinamarca.

Tabla 4 Análisis último del carbón mineral utilizado como materia prima

CARBÓN MINERAL	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)*
COSTA ATLÁNTICA	55.66	4.01	1.20	1.43	9.70
BOYACÁ	68.15	5.08	1.60	0.77	6.29
CUNDINAMARCA	78.62	5.80	1.68	0.61	9.21

***calculado**

3.2. CARACTERIZACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS

Análisis próximo de carbones activados

Los carbones activados obtenidos se caracterizaron por análisis próximo como se puede observar en la Tabla 5 Las muestras se identifican de acuerdo al tipo de carbón: Boyacá, Costa Atlántica o Cundinamarca (B, CA o C) seguido por la temperatura de activación (700, 775 o 850 °C) y por último el tiempo de activación (1.5, 2 o 2.5 h) separados por guiones. En el caso de los puntos centrales, se reporta el valor promedio de los resultados obtenidos para las tres repeticiones.

Tabla 5 Caracterización de carbones activados producidos

Carbón activado	Materia volátil B.S.[%]	Cenizas B.S. [%]	Carbón fijo B.S[%]*
B-700-1.5	3.41	32.34	64.26
B-700-2.5	2.58	34.94	62.49
B-775-2	2.81	34.19	63.00
B-850-1.5	2.43	41.41	56.16

B-850-2.5	2.17	42.80	55.03
CA-700-1.5	3.20	41.78	55.02
CA-700-2.5	2.86	39.26	57.88
CA-775-2	2.93	42.93	54.14
CA-850-1.5	2.19	55.83	41.98
CA-850-2.5	2.33	46.72	50.95
C-700-1.5	10.92	6.93	82.15
C-700-2.5	3.46	7.27	89.27
C-775-2	3.81	8.00	88.19
C-850-1.5	3.71	9.97	3.71
C-850-2.5	4.16	15.31	4.16

***calculado**

Como se puede ver en la Tabla 5, El contenido de materia volátil para los carbones de las tres regiones disminuyó considerablemente hasta en un 94% de su valor inicial, lo cual indica que el proceso de carbonización fue efectivo y se logró liberar la materia volátil para la formación inicial de la estructura porosa de los carbones activados. Por otro lado, se observa que se el contenido de cenizas para todos los carbones activados se conservó, lo cual se debe a que las cenizas no se volatilizan ni reaccionan durante el proceso de activación.

3.3. RENDIMIENTO DE LOS CARBONES ACTIVADOS

El rendimiento de los carbones activados se calculó en base seca libre de cenizas (b.s.l.c.), debido a que la masa de las cenizas se conserva durante el proceso de producción de los carbones activados. Por lo anterior, se decidió evaluar el rendimiento en base seca libre de ceniza para que está no intervenga en el valor del rendimiento másico. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$R[\%] = \frac{(CF_{CA} + MV_{CA}) * w_{CA}}{(CF_{CM} + MV_{CM}) * w_{CM}} * 100$$

En esta ecuación R es el rendimiento (b.s.l.c.), CF_{CM} es el porcentaje de carbono fijo en el carbón mineral (b.h.) MV_{CM} es el porcentaje de materia volátil en el

carbón mineral (b.h.), w_{CM} es el peso del carbón mineral, CF_{CA} es el porcentaje de carbono fijo en el carbón activado producido (b.h.) MV_{CA} es el porcentaje de materia volátil en el carbón activado (b.h.), y w_{CA} es el peso del carbón activado.

El valor del rendimiento se encuentra entre 31 % y 59% y todos los carbones activados presentan un mínimo de rendimiento en la mayor temperatura de activación (850 °C). Este comportamiento se debe a que a mayor temperatura, aumenta la constante cinética de reacción entre el carbono y el vapor de agua, por lo que se produce un mayor consumo del carbono fijo presente debido a un quemado externo de las partículas, las cuales se transforman en CO y CO₂ (Uribe et al, 2013). Las barras de error sobre los valores promedio se calcularon utilizando la desviación estándar entre los valores de R para cada una de las temperaturas de activación, manteniendo constante el tiempo de residencia. En la Figura 7 se observa que las barras de error no se superponen, lo cual sugiere que la temperatura de activación tiene un efecto importante sobre el valor final del rendimiento, y que el mejor rendimiento se obtiene en la temperatura más baja. El valor de R más bajo (31 %) se presenta para el carbón de Cundinamarca a la temperatura de 850°C, el cual tiene el mayor contenido de carbono fijo.

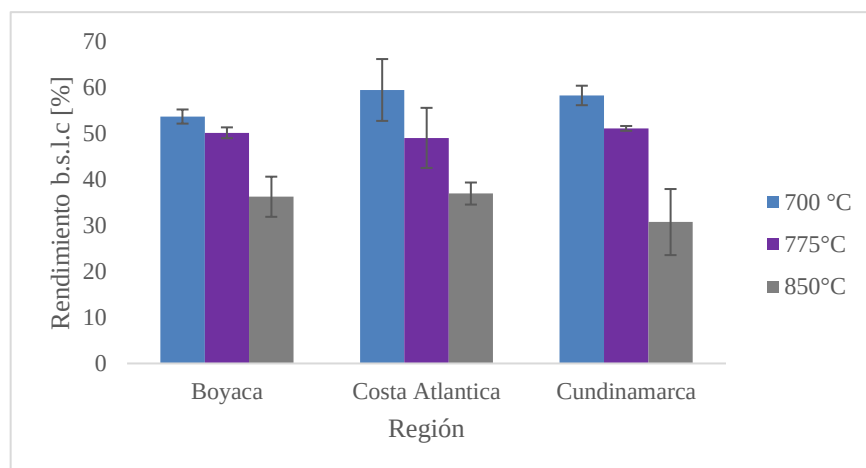


Figura 7 Efecto de la Temperatura de activación y Tipo de carbón sobre porcentaje de rendimiento b.s.l.c.

En la Figura 8 se pueden observar el efecto del tiempo de residencia de la etapa de activación sobre el rendimiento. En esta grafica se puede ver que no se puede sugerir un comportamiento de aumento o disminución en el valor de R para cada uno de los valores de tiempo de residencia, ya que las barras de error se

superponen entre sí, por lo cual no se puede concluir cuál tiempo de residencia resulta mejor para los tratamientos desarrollados.

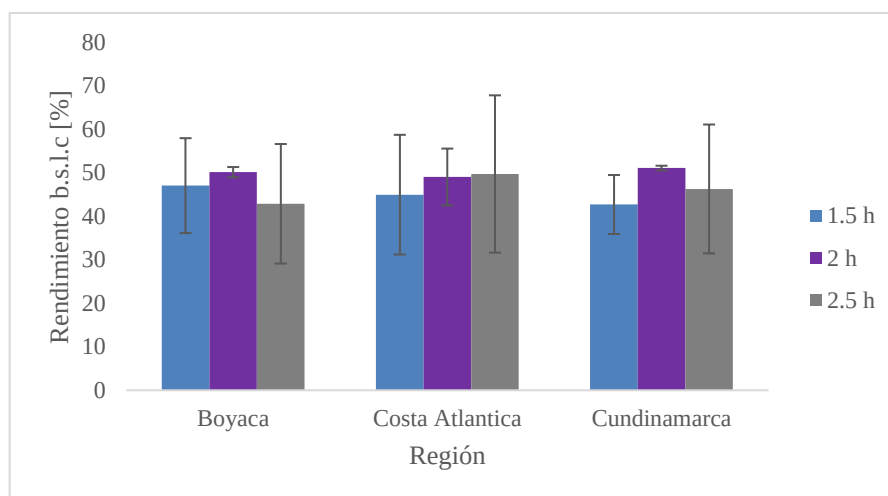


Figura 8 Efecto del tiempo de residencia y tipo de carbón sobre el porcentaje de rendimiento b.s.l.c

3.4. ANÁLISIS DEL NÚMERO DE YODO

En la Tabla 6 se pueden observar los valores obtenidos para cada uno de los carbones activados producidos. Estos valores se encuentran en un rango entre 170 y 919 mg I₂/g CS, los cuales se encuentran dentro de los valores típicos para diferentes carbones activados de origen comercial que poseen por lo general valores de número de yodo entre 600 y 1000 mg I₂/g CS (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).

Tabla 6 Numero de yodo para los carbones activados producidos

CA Boyacá	Número de yodo [mg I ₂ /g]	CA Costa Atlántica	Número de yodo [mg I ₂ /g]	CA Cundinamarca	Número de yodo [mg I ₂ /g]
B-700-1.5	157.5	CA-700-2.5	151.2	C-700-1.5	200.7
B-700-2.5	189.2	CA-700-1.5	332.7	C-700-2.5	279.3
B-775-2-1	346.6	CA-775-2-1	500.2	C-775-2-1	562.4
B-775-2-2	388.5	CA-775-2-2	380.9	C-775-2-2	571.3
B-775-2-3	364.4	CA-775-2-3	411.4	C-775-2-3	537.1
B-850-1.5	556.0	CA-850-1.5	576.4	C-850-1.5	773.1
B-850-2.5	643.6	CA-850-2.5	556.1	C-850-2.5	919.0

El número de yodo es empleado como una medida de la capacidad de adsorción de un carbón activado ya que puede relacionarse de manera directa con el área superficial, debido a que este da indicios de microporos al ser el yodo una

molécula pequeña (Uribe et al, 2013). Por esta razón es necesario hacer un análisis de cuál sería un valor adecuado de número de yodo que pueda ser relacionado con el carbón activado con las mejores características para la adsorción de oro. De acuerdo con los autores Yalcin y Arol (2002) un menor número de yodo indicaría una menor presencia de microporos, los cuales son responsables en gran medida de la capacidad adsorbente del carbón activado (Moran, 2016). Es decir, sí el número de yodo presenta valores muy pequeños indicaría una mayor presencia de macroporos, sobre los cuales no se adhiere el ion aurocianurado, sin embargo los macroporos facilitan el ingreso del ion dentro de la estructura del carbón activado aunque estos no contribuyan con la carga total de oro (Yin et al., 2014). Se debe encontrar un equilibrio que permita tener un contenido apropiado de macroporos, mesoporos, los cuales son importantes para permitir el transporte de las moléculas dentro de la estructura del carbón activado; y microporos para la adsorción de oro.

En la Figura 9 se observa el efecto de la temperatura sobre el número de yodo. Los valores promedio de número de yodo se encuentran entre 173 y 846 mg I₂/g CS. El valor del número de yodo aumenta al incrementar la temperatura de activación y este comportamiento se conserva para los carbones activados de cada una de las regiones, lo cual se debe al incremento de la microporosidad debido a las fuertes interacciones entre el vapor y el carbón. Además las barras de error no se superponen entre sí, lo cual permite inferir que la temperatura es un factor determinante en el valor de número de yodo de los carbones activados.

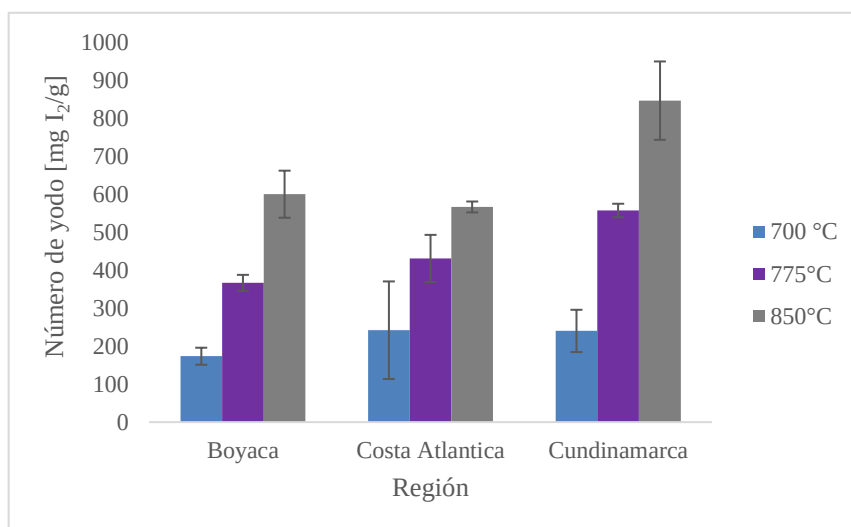


Figura 9 Efecto de la Temperatura y tipo de carbón sobre el número de yodo

Los valores de la Figura 10 corresponden al promedio entre los tratamientos a distintos tiempos de residencia para las temperaturas del diseño (700 y 850°C) y en el caso de los puntos centrales, entre las repeticiones a 775 °C; las barras de error se asignaron teniendo en cuenta la desviación estándar entre los mismos valores con los que se obtuvieron los promedios.

En la Figura 10 se puede observar el efecto del tiempo de residencia de la etapa de activación sobre el número de yodo. Los valores promedio de número de yodo se encuentran en un rango entre 353 y 599 mg I₂/g CS. Se puede observar que no existe una diferencia amplia entre los valores a distintos tiempos de residencia lo cual podría indicar que esta variable no tiene un efecto significativo en el valor final del número de yodo. Sin embargo, si se incrementa el contenido de cenizas en el carbón activado debido a que al aumentar el tiempo de residencia en la etapa de activación, el carbono fijo reacciona más con el agente activante (vapor de agua), lo que genera un mayor consumo del mismo; a su vez, la ceniza no reacciona y se concentra en el carbón activado obtenido. Las barras de error en la gráfica se superponen, lo cual sugiere que el tiempo de residencia de la etapa de activación no es un factor determinante en las características de los carbones activados.

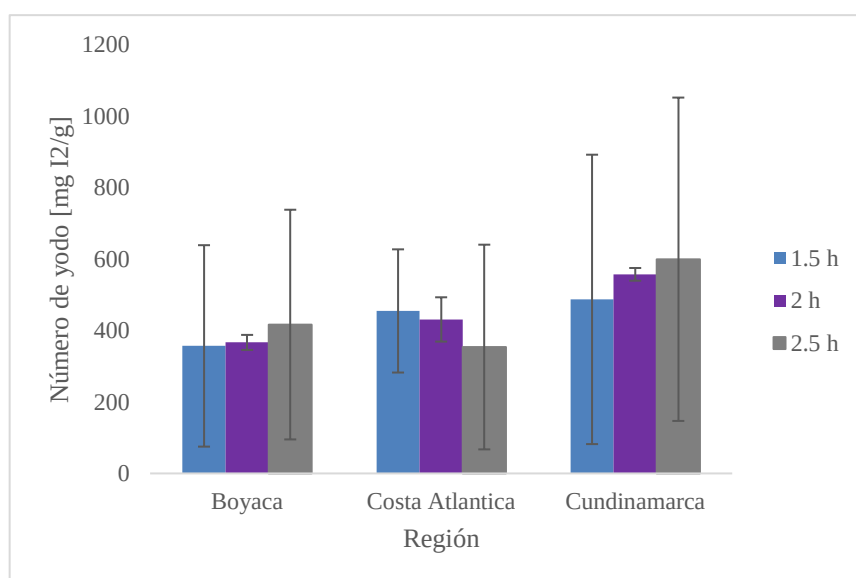


Figura 10 Efecto del tiempo de residencia y el tipo de carbón sobre el número de yodo

Para las pruebas de adsorción con oro se seleccionaron los carbones activados que presentaron los tres valores más altos y los tres más bajos de número de yodo para

evaluar la capacidad de adsorción, el área superficial y el tamaño promedio de poro, con el fin de determinar la mejor distribución de porosidad que permita mayor carga de oro en el carbón activado.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para evaluar el efecto de las variables de la etapa de activación (temperatura, tiempo de residencia) y de las características iniciales de los carbones minerales sobre los resultados obtenidos y definir si estos influyen o no sobre las características de los carbones activados se realizó un análisis de varianza (ANOVA).

El ANOVA prueba si las diferencias observadas en los ensayos se deben al azar o a que los factores estudiados (o las combinaciones de sus niveles) afectan las características de los carbones activados; en este caso el número de yodo obtenido. Este estudio se realiza usando el valor P y el nivel de significancia (α); El valor P es un valor estadístico que indica la probabilidad de que el resultado obtenido en la variable de respuesta (número de yodo) sea obtenido por azar y no por verdadera influencia de los factores. El valor P sirve para determinar si los resultados son estadísticamente significativos, entre más pequeño sea el valor P, mayor es la probabilidad de que las variables sean significativas, es decir, que influyan sobre el fenómeno estudiado.

Para determinar si el análisis realizado es confiable, el valor P se compara con el nivel de significancia (α). Para el desarrollo de este trabajo se utilizó un valor de α de 5% (0.005), es decir que los resultados del ANOVA poseen un 95% de probabilidad de ser acertados. Si se obtiene un valor P menor que el nivel de significancia, el tratamiento, factor o interacción correspondiente es significativo, es decir, que influye sobre la variable de respuesta.

La hipótesis nula se utiliza en el análisis de varianza para estudiar la influencia de cada factor y sus interacciones. El rechazo de la hipótesis nula, sea para los factores o las interacciones, se realiza cuando el valor P es menor al nivel de significancia α . Para los efectos principales de los factores, la hipótesis nula plantea que ningún nivel de los factores genera diferencias sobre el número de

yodo de los carbones activados. Por lo tanto rechazar la hipótesis nula es aceptar que al menos uno de los niveles de los factores o sus interacciones genera diferencias en la variable de respuesta.

3.5.1. Efecto de las variables sobre el número de yodo

Se utilizó el paquete estadístico Minitab 17 para analizar los datos utilizando la técnica de optimización factorial. Se evaluó la influencia de las variables: Temperatura de activación, tiempo de residencia en la activación y porcentaje de ceniza inicial en base seca. No se incluye el porcentaje de carbono fijo inicial en base seca como factor debido a que esta variable está correlacionada con el valor del porcentaje de ceniza inicial en base seca; sin embargo esta variable se estudió de manera independiente para analizar su influencia en el valor de número de yodo.

En la Tabla 7 se presenta el valor P y el valor F para los efectos principales y la interacción de los factores.

Tabla 7 Análisis de varianza del número de yodo

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor P
Temperatura	2	382139	191069	53.04	0
Tiempo de residencia	2	32383	16191	4.49	0.041
Ceniza inicial b.s	2	17901	8951	2.48	0.133
Tiempo de residencia Ceniza inicial b.s	4	14812	3703	1.03	0.439
Error	10	36024	-	-	-
Total	20	813644	-	-	-

b.s: base seca

Se puede observar que la hipótesis nula se rechaza para los efectos principales de los factores temperatura y tiempo de residencia, es decir que estos influyen en el valor del número de yodo. Además, el valor F define el orden de importancia de las fuentes de variación estudiadas, por lo tanto, la variable más importante es la temperatura. Cabe resaltar que existe una gran diferencia entre los valores F de los factores lo cual sugiere que el tiempo de residencia no es un factor determinante en el resultado del valor de número de yodo.

En la Figura 11 se observan los valores promedio de número de yodo en función de los factores estudiados. Se observa que el efecto de la temperatura de activación es positivo ya que al aumentar esta también incrementa el valor de número de yodo, esto debido al incremento de la microporosidad por las fuertes interacciones entre el vapor y el carbón.

Por otro lado, el tiempo de residencia tiene un efecto positivo inicialmente; sin embargo, al alcanzar un tiempo mayor a 2 horas el número de yodo decrece con el aumento del tiempo. Este comportamiento se debe a que durante la carbonización se forman compuestos derivados de alquitrán sobre la estructura interna del carbón, por lo que en principio, el agente activante incrementa la microporosidad al consumir estos compuestos; sin embargo, con un tiempo de residencia más extenso, las interacciones del carbonizado con el agente activante convierten el carbono de la superficie interna de los microporos, en meso y macroporos. Más aún, con mayor tiempo de residencia se incrementa el contenido de cenizas y disminuyen los sitios activos del carbón al quemarse el material.

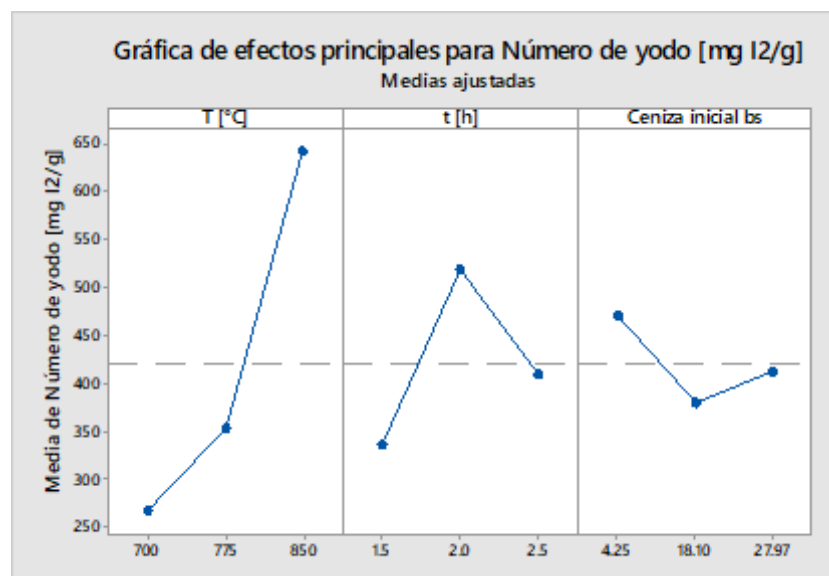


Figura 11 Efectos principales sobre el número de yodo

El contenido de cenizas tiene un efecto negativo en el valor de número de yodo debido a que las cenizas no reaccionan ni se volatilizan durante el proceso, por lo cual estas no aportan al desarrollo de la porosidad de los carbones. De acuerdo con los autores Linares et al (1999) el contenido de ceniza debe ser lo más bajo posible ya que estas en si solo aportan peso mas no capacidad de adsorción.

- **Efecto del contenido de carbono fijo inicial sobre el valor del número de yodo.**

Se realizó un análisis de varianza de un solo factor para el contenido de carbono fijo inicial en base seca para estudiar la influencia de esta variable sobre el número de yodo. En la Tabla 8 se puede observar el ANOVA correspondiente, el valor P es mayor al nivel de significancia lo cual refleja que contenido de carbono fijo no tiene un efecto importante en el valor del número de yodo. Sin embargo según Marsh & Rodríguez-Reinoso (2006) el contenido de carbono fijo inicial hace parte de las características especiales que debe tener el material precursor que permita el desarrollo de áreas superficiales adecuadas para la adsorción de oro; por lo tanto esta variable si influye en el valor del número de yodo.

Los resultados del ANOVA pueden deberse a que los tres carbones evaluados en este estudio presentan características iniciales muy similares en términos de grado de carbonización, con diferencias porcentuales de máximo 4% en el contenido de carbón fijo (b.s.l.c.): Boyacá 56.10%, Costa Atlántica 59.88% y Cundinamarca 57.21 %.

Por lo anterior, es necesario extender el estudio a carbones con diferencias más grandes entre sí para establecer el efecto del grado de carbonización del carbón

Tabla 8 Análisis de varianza para el contenido de carbono fijo inicial sobre el número de yodo

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor P
Carbono fijo inicial b.s.	2	113073	56537	1.45	0.26
Error	18	700571	-	-	-
Total	20	813644	-	-	-

b.s: base seca

3.5.2. Efecto de las variables sobre el rendimiento

Se utilizó el paquete estadístico Minitab 17 para analizar los datos utilizando la técnica de optimización factorial. Se evaluó la influencia de las variables: Temperatura de activación, tiempo de residencia en la activación y porcentaje de ceniza inicial en base seca y su influencia en el valor del rendimiento.

Tabla 9 Análisis de varianza para el rendimiento

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor P
Temperatura	2	1295.75	647.88	32.59	0
tiempo de residencia	2	78.4	39.2	1.97	0.19
Ceniza inicial b.s.	2	17.65	8.83	0.44	0.654
t*ceniza	4	17.02	4.25	1.03	0.925
Error	10	198.8	-	-	-
Total	20	1915.96	-	-	-

b.s: base seca

En la Tabla 9 se presenta el valor P y el valor F para los efectos principales y la interacción de los factores. Se puede ver que la hipótesis nula se rechaza para el efecto principal de la Temperatura, es decir, que esta genera un cambio en el valor del rendimiento.

En la Figura 12 Figura 11se observan los valores promedio de Rendimiento en base seca libre de ceniza en función de la temperatura de la etapa de activación. Se puede observar que la temperatura tiene un efecto negativo sobre el rendimiento ya que cuando ésta sobrepasa los 775°C, el rendimiento disminuye rápidamente desde valores superiores al 55% hasta 35%. Este comportamiento se debe a que a mayor temperatura aumenta la constante cinética de reacción entre el carbono y el vapor de agua, por lo que se produce un mayor consumo del carbono fijo presente.

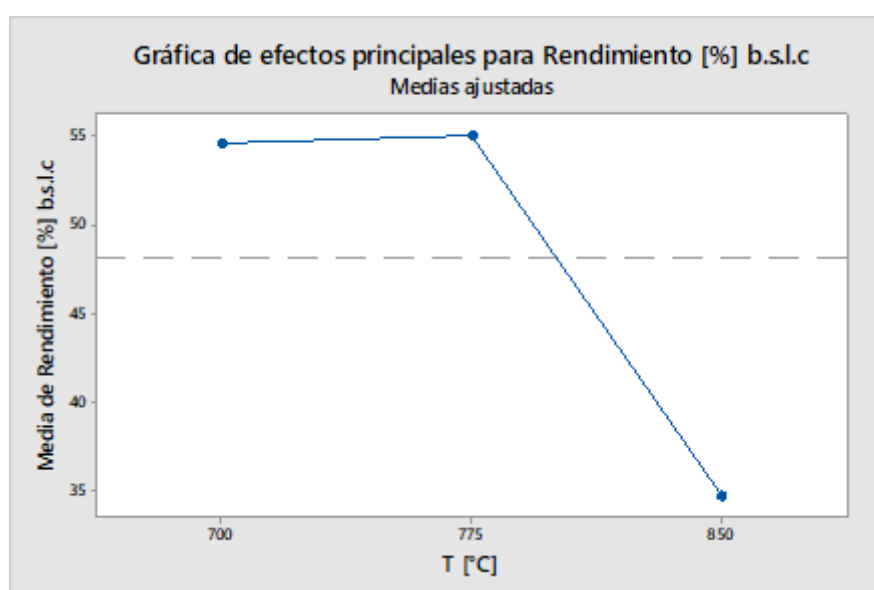


Figura 12 Efectos principales sobre el Rendimiento

- **Efecto del contenido de carbono fijo inicial sobre el rendimiento**

Se realizó un análisis de varianza de un solo factor para el contenido de carbono fijo inicial en base seca para estudiar la influencia de esta variable sobre el rendimiento. En la Figura 10 se puede observar el ANOVA correspondiente, el valor P es mayor al nivel de significancia lo cual refleja que contenido de carbono fijo no tiene un efecto importante en el valor de R.

Tabla 10 de varianza para el contenido de carbono fijo inicial sobre el número de yodo

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor P
Carbono fijo inicial b.s.	2	7.97	3.98	0.04	0.963
Error	18	1907.99	-	-	-
Total	20	1915.96	-	-	-

Al igual que en el análisis del efecto de esta variable sobre el número de yodo, los resultados obtenidos para el efecto del carbono fijo inicial reflejan que ésta variable no influye sobre los valores finales de rendimiento; sin embargo, los tres carbones evaluados en este trabajo presentan características iniciales muy parecidas entre sí, lo cual no permite que se realice un análisis adecuado de acuerdo a la información proporcionada.

3.6. ANÁLISIS DE ÁREA SUPERFICIAL

En la Tabla 11 se presentan los resultados del área superficial BET, volumen y tamaño de microporos para las muestras de carbón activado C-850-2.5, C-850-1.5 y B-850-2.5. El área superficial es comúnmente definida entre 400 y 1500 m²/g y el volumen de los poros como mayor que 0.2 cm³/g para carbones activados (Navarro & Vargas, 2010), de acuerdo a esta información, los carbones activados con mayor número de yodo si cumplen con las características de los carbones activados comerciales. Se observa que los números de yodo más altos corresponden a los tratamientos con 850°C lo que confirma que la temperatura es un factor determinante en el desarrollo de la microporosidad.

La mayor área superficial se obtuvo para el carbón C-850-2.5 (773.17 m²/g) con un contenido de 48% de microporos. Sin embargo el carbón que presento mejor capacidad de carga de oro fue el C-850-1.5 (9.74 mg Au/ g CS), con un área superficial de 588.91 m²/g, de la que 369.17 m²/g corresponde a microporos.

Tabla 11 Análisis de área, volumen y tamaño de poro (Modelo BET)

Muestra	Área superficial BET (m ² /g)	Área microporos (m ² /g)	Volumen de poro (cm ³ /g)	Volumen microporos (cm ³ /g)	Tamaño de poro (Å)
C-850-2.5	773.17	369.17	0.70	0.17	36.52
C-850-1.5	588.91	328.42	0.43	0.15	28.97
B-850-2.5	474.86	339.31	0.24	0.16	19.88

El desarrollo de la microporosidad de los carbones activados se encuentra entre 48 y 71 %, valores que concuerdan con los resultados obtenidos de número de yodo ya que este es una medida de la microporosidad. Autores como Arenas y Chejne (2004) recomiendan una combinación de CO₂ y vapor de agua para desarrollar estructuras microporosas mas definidas debido a que el vapor por si solo tiende a ensanchar los poros.

Se puede observar que el volumen promedio de poro y el tamaño de poro son directamente proporcionales al número de yodo ya que aumentan y disminuyen en la misma dirección.

3.7. PRUEBAS DE ADSORCIÓN DE ORO

Para las pruebas de adsorción con oro se seleccionaron los carbones activados que presentaron los tres valores más altos y los tres más bajos de número de yodo con el fin de identificar el efecto de la distribución de micro y macroporos sobre la adsorción de oro. Los tres carbones con mejores números de yodo fueron C-850-2.5 (919 mg I₂/g CS), C-850-1.5 (773.1 mg I₂/g CS) y B-850-2.5 (643.6 mg I₂/g CS). Los tres carbones con los valores más bajos de número de yodo fueron B-700-2.5 (189.2 mg I₂/g CS), B-700-1.5 (157.5 mg I₂/g CS) y CA-700-2.5 (151.2 mg I₂/g CS).

La capacidad de carga máxima de oro sobre el carbón activado se determinó en base a los datos experimentales de adsorción de oro, para lo cual se asumió un comportamiento de adsorción tipo isoterma de Freundlich.

El valor de K se obtuvo realizando una regresión no lineal de los datos experimentales utilizando el método de mínimos cuadrados con ayuda de la

herramienta *solver* de Excel. Los datos y las gráficas que se realizaron en este paso se pueden ver detalladamente en el anexo 2.

Tabla 12 Capacidad de adsorción de Oro

Muestra	K (mg Au/ g CS)	R² del ajuste	Número de yodo
C-850-1.5	9.74	0.99	773.12
C-850-2.5	8.06	0.99	919
B-850-2.5	8.15	0.96	643.62
CA-700-2.5	0.36	0.98	151.2
B-700-2.5	0.22	0.99	189.2
B-700-1.5	0.01	0.92	157.5

En la Tabla 12 se observan los K obtenidos para los seis carbones que fueron seleccionados y sus respectivos R² de los ajustes realizados a la ecuación de Freundlich. El valor de K más alto (9.74 mg Au/g CS) se obtuvo para el carbón C-850-1.5 y en general los tres carbones activados con mayores números de yodo fueron los que tuvieron los valores de K más altos. Esto se debe a que al tener un mayor número de yodo, los carbones poseen un mayor contenido de microporos, los cuales son responsables de la capacidad de adsorción del carbón. Por otro lado los carbones con menor número de yodo presentaron valor para K muy pequeños, lo que refleja que estos carbones no fueron efectivos para adsorber oro en su superficie.

A pesar de que carbón activado C-850-2.5 tuvo la mayor área superficial (773.17 m²/g) y el mayor número de yodo (919 mg I₂/g), este presentó el menor valor de K (8.06 mg Au/ g CS) de los tres CA con mejor número de yodo. Esto puede deberse a que al ser producido a la temperatura más alta y el tiempo de residencia más extenso, el carbón estuvo más expuesto al agente activante por lo que tiene un mayor contenido de cenizas (15.31% b.s.), las cuales generan sitios inactivos donde no se adsorbe el carbón.

El mejor tratamiento fue el de C-850-1.5 el cual obtuvo un valor de K de 9.74 mg Au/ g CS, este posee una distribución entre micro y macroporos que permiten que el complejo aurocianurado vaya desde la solución hasta el interior del carbón activado y un menor contenido de cenizas (9.97% b.s.).

Las diferencias entre los valores de K de los carbones activados C-850-2.5 y C-850-1.5 comprueban que un tiempo más extenso genera la concentración de cenizas, las cuales disminuyen la superficie interna disponible para la adsorción de oro.

4. CONCLUSIONES

- Se determinó que es posible obtener carbones activados con características adecuadas para la adsorción de oro a partir de carbón mineral colombiano.
- En términos del rendimiento másico en base seca libre de cenizas obtenido para la producción de carbón activado, es más viable utilizar valores de temperatura de hasta 775°C puesto que a temperaturas más altas, el rendimiento de los carbones disminuye hasta en un 65%.
- El número de yodo es un buen indicador de la presencia de microporos en el carbón activado; sin embargo, este valor no refleja directamente la capacidad de adsorción de oro del carbón ya que éste análisis no contribuye a establecer una medición sobre los sitios activos sobre los que los complejos aurocianurados se adsorben preferiblemente. En conclusión, el número de yodo sirve el propósito de preseleccionar los carbones activados de acuerdo a la magnitud del mismo, pero no establece una clasificación acertada sobre la capacidad de adsorción de oro del carbón activado.
- Una mayor área superficial no garantiza que el carbón activado presente una mayor capacidad de adsorción de oro, ya que es necesario que el carbón tenga una distribución adecuada entre los microporos y los macroporos para que sea posible el proceso de transporte al interior del carbón y la adsorción de los complejos aurocianurados.
- Al analizar las características físicas de los carbones activados, se concluyó que frente a las variables establecidas en el diseño experimental, el efecto de la temperatura de la etapa de activación es la que tiene mayor influencia sobre el número de yodo. Al incrementar la temperatura, incrementa el número de yodo.
- El contenido de cenizas del material precursor debe ser lo menor posible ya que estas tienen un efecto negativo sobre el desarrollo de las características de los carbones activados, debido a que se comportan como un material inerte durante el proceso de carbonización y activación de los carbones.
- El carbón activado que presento las mejores características para la adsorción de oro en su superficie. fue el tratamiento C-850-1.5, el cual obtuvo el mayor valor de K (9.74 mg Au/ g CS) y la mejor distribución de micro y macroporos.

5. RECOMENDACIONES

- Estudiar el rendimiento y número de yodo de carbones activados, realizando un tratamiento de beneficio previo a los carbones minerales, como liberación de materia mineral para disminuir el contenido de cenizas, las cuales no aportan al desarrollo de una superficie idónea para la adsorción de oro.
- Medir la capacidad de adsorción utilizando soluciones cianuradas reales provenientes de una mina de cianuración de oro.
- Evaluar los grupos funcionales presentes en los carbones activados.
- Evaluar el uso de una combinación de CO₂ y vapor de agua como agente activante.
- Comparar las características del carbón activado producido con carbones activados comerciales producidos a partir de otros precursores con el fin de establecer un análisis de factibilidad en el uso de éstos en la industria aurífera a pequeña y mediana escala en Colombia.
- Realizar un estudio cinético del proceso con el mejor carbón activado producido con el fin de realizar un dimensionamiento de los equipos de plantas de *Carbon in Pulp* o *Carbon in Leach*.

6. REFERENCIAS

- Arenas, E., & Chejne, F. (2004). The effect of the activating agent and temperature on the porosity development of physically activated coal chars. *Carbon*, 42(12–13), 2451–2455.
- Bah, A. I. (2012). Preparación y caracterización de carbón activado a partir de residuos de biomasa y su utilización en tratamientos de descontaminación del agua. Universidad de Extremadura.
- Benabithe, Z. Z., Giraldo, C. L., Rodriguez, D., Castiblanco, E., Janna, F., & Schile, J. (2005). Activated Carbon Production From Subbituminous Coal in Fluidized Bed Reactors By Autothermal Process. *Dyna*, 147, 47–56.
- Goyes, R. E. P., Uribe, J. M., González, I., & Torres-palma, R. a. (2013). Revista Colombiana de Materiales N.4. Abril de 2013, pp. 93 - 108. *Revista Colombiana de Materiales N 4 Abril 2013*, (Ic), 93–108.
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*. (Elsevier, Ed.) (First edit). Elsevier Ltd.
- McDougall, G. J., Hancock, R. D., Nicol, M. J., Wellington, O. L., & Copperthwaite, R. G. (1980). The mechanism of the adsorption of gold cyanide on activated carbon. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 344–356. <https://doi.org/10.1007/BF02666425>
- Ministerio de minas y energia. (2012). *Cadena del Carbón*. (J. J. Manrique Galvis, Ed.) (UPME). Colombia: UPME.
- Urbanic, J. E., Jula, R. J., & Faulkner, W. D. (1983). Regeneration of activated carbon used for recovery of gold, (1).
- Yalcin, M., & Arol, A. I. (2002). Gold cyanide adsorption characteristics of activated carbon of non-coconut shell origin. *Hydrometallurgy*, 63(2), 201–206. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(01\)00203-1](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00203-1)
- Yin, C. Y., Ng, M. F., Saunders, M., Goh, B. M., Senanayake, G., Sherwood, A.,

- & Hampton, M. (2014). New insights into the adsorption of aurocyanide ion on activated carbon surface: Electron microscopy analysis and computational studies using fullerene-like models. *Langmuir*, 30(26), 7703–7709. <https://doi.org/10.1021/la501191h>
- Ovín, A. M. C. (2003). Depuración de efluentes industriales con Carbón Activo. Adsorción de contaminantes y regeneración del adsorbente. Universidad de Oviedo, 394.
- Rodríguez-Reinoso, F., 2010. Problemas más habituales en el uso de la adsorción física como técnica de caracterización de sólidos porosos. *Materiales en adsorción y catálisis*, (0), pp.8–9.
- Rincón, J., Rincón, S., Guevara, P., Ballén, D., Morales, J. C., & Monroy, N. (2015). Producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías. *Rev. Acad. Colomb. Ciencias*, 39(151), 171–175.
- Seke, M. D., Sandenbergh, R. F., & Vegter, N. M. (2000). Pergamon EFFECTS OF THE TEXTURAL AND SURFACE PROPERTIES OF, 13(5), 527–540.
- Sevilla, U. (n.d.). Manual del Carbón Activo, 1–89. Retrieved from www.aguapedia.net
- Urbanic, J. E., Jula, R. J., & Faulkner, W. D. (1983). Regeneration of activated carbon used for recovery of gold, (1).
- Uribe, L., López, M., & Gonzalez, A. (2013). Activación de carbón mineral mediante proceso físico en horno tubular horizontal y atmosfera inerte. *Revista Colombiana de Materiales*, 4, 25–40.
- Yin, C. Y., Ng, M. F., Saunders, M., Goh, B. M., Senanayake, G., Sherwood, A., & Hampton, M. (2014). New insights into the adsorption of aurocyanide ion on activated carbon surface: Electron microscopy analysis and

computational studies using fullerene-like models. *Langmuir*, 30(26), 7703–7709.

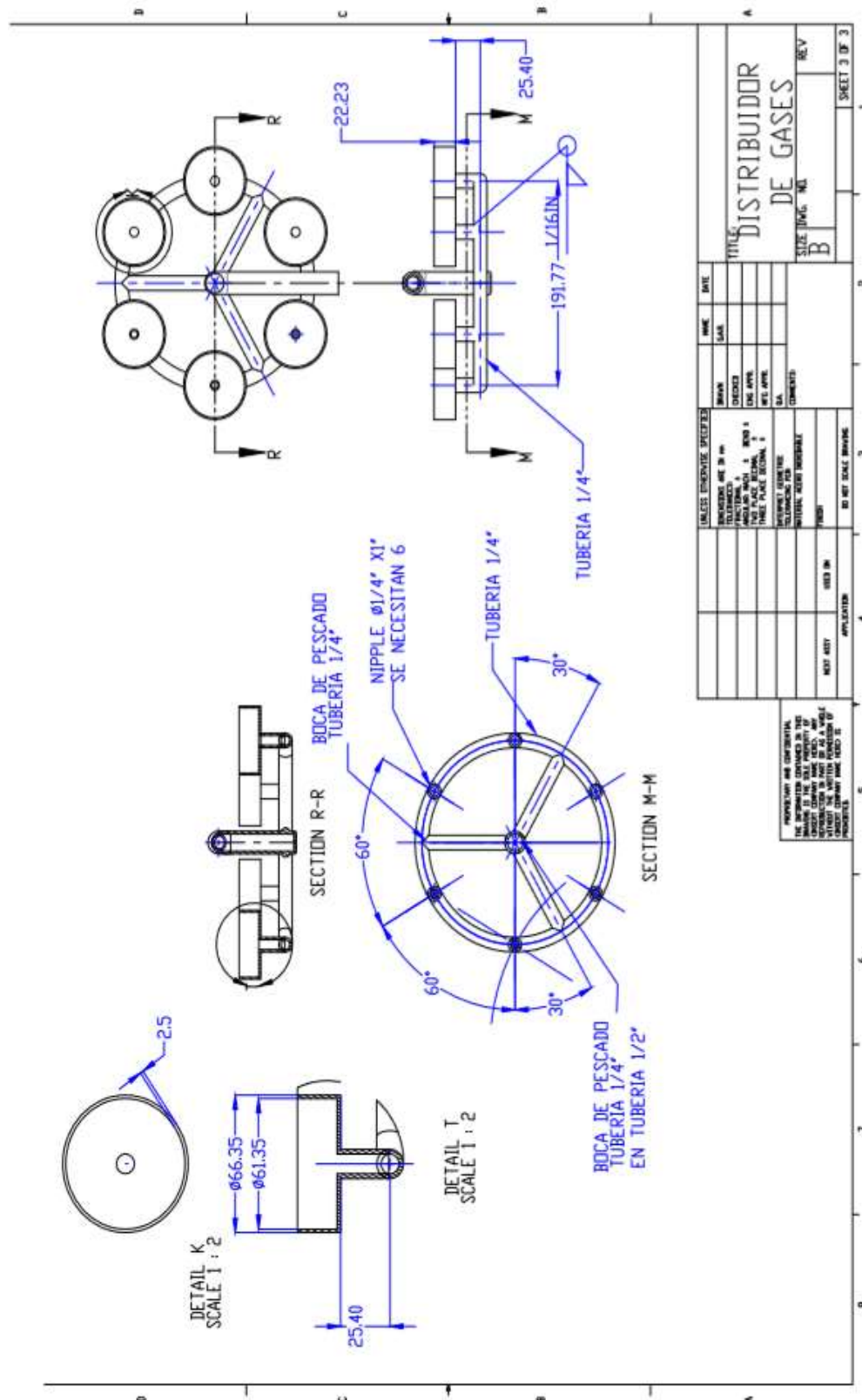
Yalcin, M., & Arol, A. I. (2002). Gold cyanide adsorption characteristics of activated carbon of non-coconut shell origin. *Hydrometallurgy*, 63(2), 201–206.

REACTORES EN PORCELANA PARA ALTAS TEMPERATURAS

SECTION B-B

SE NECESITAN 8 UNIDADES

REVISION	DATE	BY	CHKD	APPV	COMMENTS
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					
41					
42					
43					
44					
45					
46					
47					
48					
49					
50					
51					
52					
53					
54					
55					
56					
57					
58					
59					
60					
61					
62					
63					
64					
65					
66					
67					
68					
69					
70					
71					
72					
73					
74					
75					
76					
77					
78					
79					
80					
81					
82					
83					
84					
85					
86					
87					
88					
89					
90					
91					
92					
93					
94					
95	</				



ANEXO 2. DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBAS DE ADSORCION DE ORO.

Tabla 13 Datos regresión no lineal isoterma de Freundlich

Muestra	Concentración de Au en el equilibrio (ppm)	X/M experimental (mg Au/g CS)	X/M calculado	R ²	Suma de errores cuadráticos
C-850-2.5	0.07	2.57	3.43	0.99	6.77
	1.00	9.00	8.06		
	18.92	21.09	20.72		
	28.03	22.01	23.51		
	10.32	17.71	17.06		
	50.44	27.44	28.38		
	73.95	33.29	32.09		
C-850-1.5	0.03	2.59	3.48	0.99	17.8602484
	0.3	9.72	6.84		
	16.25	23.67	22.10		
	25.41	24.59	25.20		
	7.88	20.11	17.87		
	48.35	29.52	30.45		
	73.11	34.20	34.38		
B-850-2.5	0.021	5.19	3.03	0.96	25.55
	1.84	8.18	9.53		
	20.49	19.48	17.69		
	32.64	17.39	19.93		
	12.2	15.87	15.49		
	56.78	21.15	22.97		
	79.86	27.51	25.07		
B-700-1.5	4.02	0.59	0.10	0.92	0.44
	9.84	0.16	0.33		
	14.79	0.21	0.57		
	37.96	2.01	2.06		
	26.62	1.45	1.27		
B-700-2.5	2.85	1.17	0.58	0.99	0.45
	8.44	1.56	1.64		
	12.86	2.14	2.44		
	33.78	6.18	6.11		
	23.69	4.40	4.36		
CA-700-2.5	2.77	1.22	0.72	0.98	0.44
	8.46	1.53	1.55		
	13.29	1.71	2.12		
	35.65	4.33	4.20		

- Gráficas de Isotermas de Freundlich para los tres carbones con mejor número de yodo

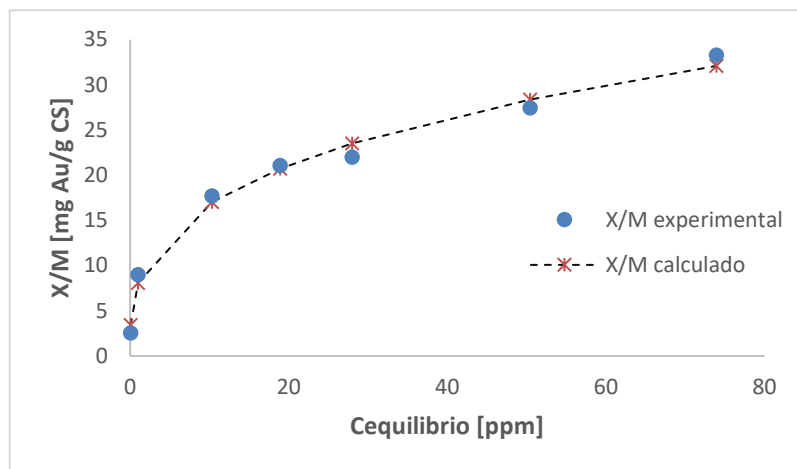


Figura 13 Isoterma de adsorción de oro sobre C-850-2.5

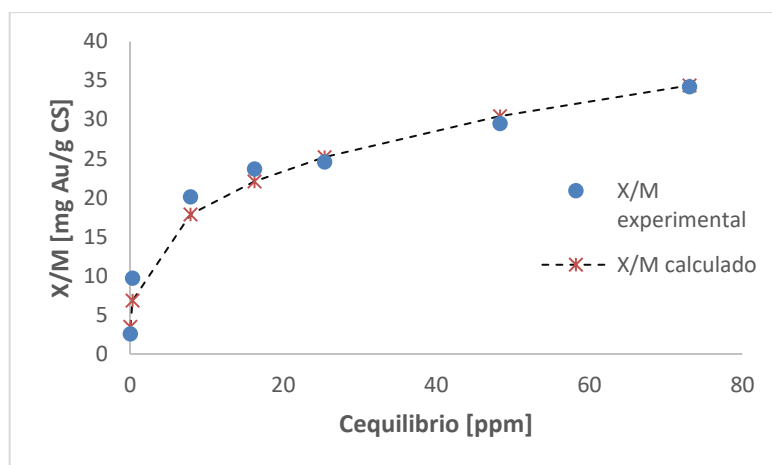


Figura 14 Isoterma de adsorción de oro sobre C-850-1.5

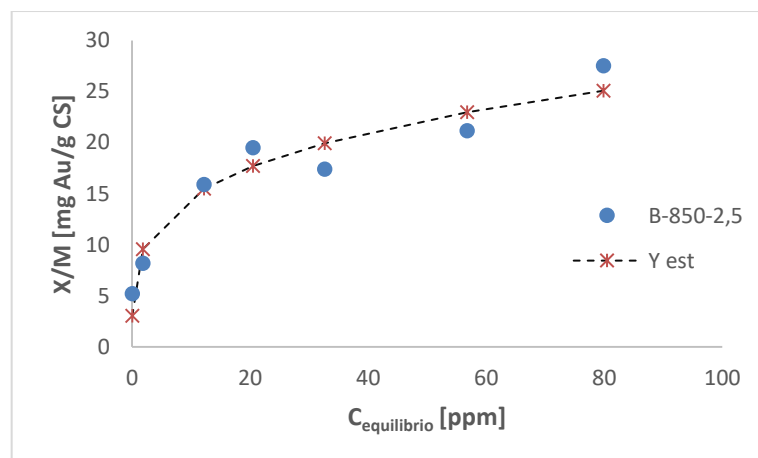


Figura 15 Isoterma de adsorción de oro sobre B-850-2.5

- Gráficas de Isotermas de Freundlich para los tres carbones con menor número de yodo

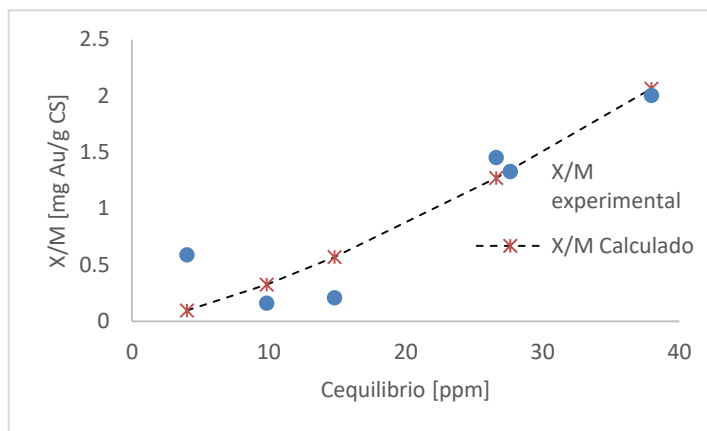


Figura 16 Isoterma de adsorción de oro sobre B-700-1.5

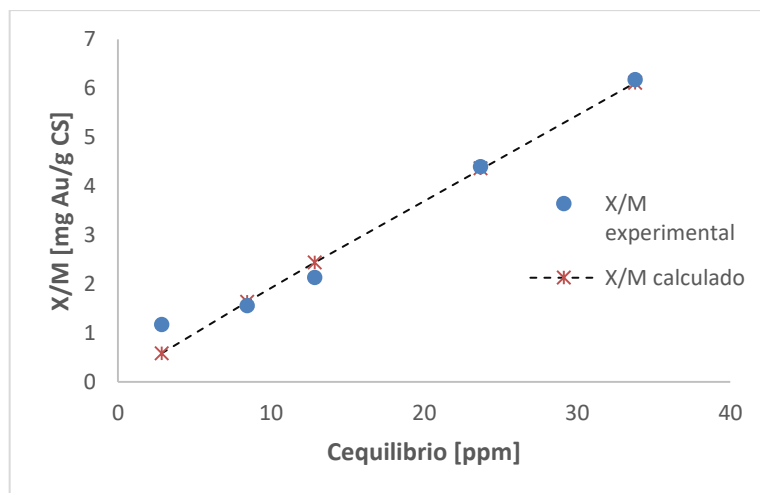


Figura 17 Isoterma de adsorción de oro sobre B-700-2.5

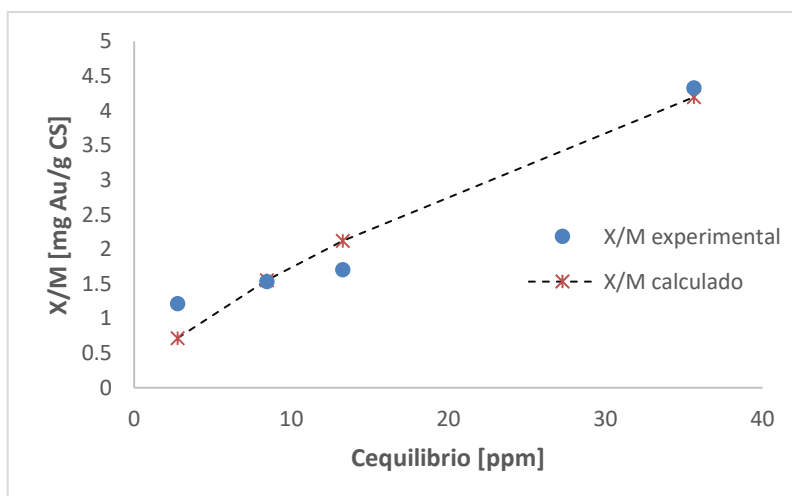


Figura 18 Isoterma de adsorción de oro sobre CA-700-2.5