

7



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE  
MATERIALES DE DESECHO Y SU APLICACIÓN PARA LA  
REMOCIÓN DE Hg CONTENIDO EN AGUA**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERA QUÍMICA**

P R E S E N T A:  
**GABRIELA ANGUIANO CORTÉS**



2000-03-09



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

<b>Presidente</b>	Prof. Rodolfo Torres Barrera
<b>Vocal</b>	Prof. José Luis López Martínez
<b>Secretario</b>	Dra. Rosa María Ramírez Zamora
<b>1er. Suplente</b>	Prof. Baldomero Pérez Gabriel
<b>2do. Suplente</b>	Prof. Alfonso Durán Moreno

**Sitio donde se desarrolló el tema**

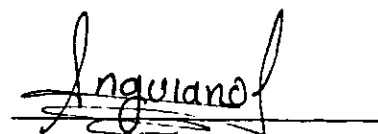
**Coordinación de Ingeniería Ambiental, Instituto de Ingeniería. UNAM.**

**Asesor del tema:**



Dra. Rosa María Ramírez Zamora

**Sustentante:**



Gabriela Anguiano Cortés

## AGRADECIMIENTOS

Con especial agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por darme una formación como profesionista.

Dra. Rosa María Ramírez Zamora por su dirección y apoyo en este trabajo.

M en B. Arodí Bernal Martínez por sus consejos y apoyo en la elaboración de este trabajo.

Finalmente, gracias a todas las personas que hicieron posible este trabajo.

## DEDICATORIA

*A dios:*

por haberme permitido llegar a la realización de esta meta.

*A mis padres:*

*José Antonio Anguiano Pérez.*

*María Cortés de Anguiano.*

Un verdadero padre es aquel que batalla contigo en todo momento, que disfruta de tus éxitos y alienta a superar los fracasos, y te da todo su amor, ustedes han sabido ser verdaderos padres, doy gracias a ese ser supremo por haberme dado como padre a dos seres como ustedes

*A mis hermanos:*

*Antonio, Alejandra.*

*David, Edmundo.*

A todas aquellas personas que me ayudaron a madurar, superarme y entender que la amistad puede ser el don más preciado que cualquiera puede tener.

***Gabriela Anguiano Cortés***

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. - REVISION BIBLIOGRAFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL PROCESO DE ADSORCION.....</b>	<b>3</b>
1.1.1. – Definición y tipos de adsorción.....	3
1.1.2. -Modelos de equilibrio: cinética e isothermas de adsorción.....	9
1.1.2.1. Isotherma de adsorción de Langmuir.....	12
1.1.2.2. Isotherma de adsorción de Freundlich.....	14
<b>1.2 CARBON ACTIVADO (CA): principal adsorbente utilizado en el tratamiento de agua.....</b>	<b>15</b>
1.2.1 - Definición.....	16
1.2.2.-Procesos de producción de carbón activado.....	19
1.2.2.1 Activación química.....	22
1.2.2.2. Activación física.....	25
1.2.3. Aplicaciones del carbón activado ( CA).....	27
<b>1.3. - EL MERCURIO.....</b>	<b>29</b>
1.3.1 Propiedades físicas, químicas y toxicológicas del mercurio.....	30
1.3.2 Contaminación.....	32
1.3.3 El mercurio en agua.....	33
1.3.4 Normatividad.....	33
Procesos de tratamiento de mercurio en agua.....	34
<b>2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>38</b>
<b>2.1 MATERIALES Y REACTIVOS.....</b>	<b>38</b>
2.1.1. Proceso de producción de carbón activado.....	38
2.1.2. Proceso de adsorción con carbón activado (CA).....	41
2.1.2.1. Materiales adsorbentes y adsorbato.....	41
<b>2.2.- SISTEMAS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>41</b>
2.2.1. - Procesos de producción de carbón activado.....	41
2.2.2 Proceso de adsorción de carbón activado.....	42
<b>2.3. - TECNICAS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>42</b>
2.3.1. Proceso de producción con carbón activado.....	42
2.3.2 - Proceso de adsorción.....	47

<b>2.4 TECNICAS ANALÍTICAS.....</b>	<b>47</b>
2.4.1 Proceso de producción de carbón activado.....	47
2.4.2. Proceso de adsorción.....	50
2.4.2.1 Determinación de mercurio.....	50
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBON ACTIVADO.....</b>	<b>51</b>
3.1.1 Caracterización fisicoquímica de materiales.....	51
3.1.2 Características superficiales de materiales-Estudio en microscopio electrónico de barrido (Scanning Electrón Microscopy SEM).....	53
<b>3.2 PROCESO DE ADSORCIÓN DE MERCURIO.....</b>	<b>58</b>
<b>3.3 ESTUDIO ECONOMICO.....</b>	<b>60</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>91</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características del contenido de mercurio en la hidrosfera (Catala, 1993).	33
Tabla 2.1 Características de coque de petróleo .....	39
Tabla 2.2 Carbón comercial LQ1000.....	41
Tabla 3.1 Características fisicoquímicas de materiales adsorbentes .....	52
Tabla 3.2 Constantes de Langmuir y Freundlich de mercurio para diferentes adsorbentes.....	58
Tabla 3.3 Balance de materia.....	61
Tabla 3.4 Consumo nacional aparente de carbón activado.....	64
Tabla 3.5 Programa de producción. ....	65
Tabla 3.6a Activos fijos.....	66
Tabla 3.6b Activos diferidos.....	66
Tabla 3.7a Costos de la mano de obra directa .....	68
Tabla 3.7b Costos de la mano de obra indirecta .....	68
Tabla 3.8 Depreciación y amortización de la inversión fija y diferida.....	69
Tabla 3.9 Costos de producción de carbón activado a partir de cáscara de cacahuete y $ZnCl_2$ .....	71
Tabla 3.10 Costos unitarios de (\$/Kg.) los carbones activados.....	73
Tabla D1 Costos de producción para coque de petróleo y ácido fosfórico.....	91
Tabla D2 Costos de producción para coque de petróleo e hidróxido de sodio.....	93



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Isoterma típica para el modelo de adsorción de Langmuir. ....	13
Figura 1.2 Isotermas de Langmuir y Freundlich. ....	15
Figura 1.1 Diagrama de bloques para la activación química de aserrín (Banzal, et al, 1988). ....	24
Figura 2.1 Diagrama de bloques de elaboración de carbón activado. ....	43
Figura 3.1a) Granos tratados con ácido fosfórico. ....	53
Figura 3. 1e) Partícula de LQ1000 (carbón acticado comercial) y f) Partícula de cáscara de cacahuete activada con $ZnCl_2$ . ....	54
Figura 3.2a) Coque activado con $H_3PO_4$ . ....	55
Figura 3.3a) Un grano de coque activado ....	56
Figura 3.3c) El mapa del carbón con señal $K\alpha$ obtenido por EDS. ....	57
Figura 3.1 Dosis adsorbente vs Concentración residual de mercurio en agua ....	59

## NOMENCLATURA

cm	Centímetros
°C	Grados centígrados
C.A	Carbón activado
CAG	Carbón activado granular
CAP	Carbón activado peletizado
C.C	Cáscara de cacahuete
C	Concentración
C.P	Coque de petróleo
C.P.H.	Carbón activado preparado con $H_3PO_4$
C.P.N.	Carbón activado preparado con NaOH
C.P.Z.	Carbón preparado con $ZnCl_2$
Cs	Concentración de saturación
C.T	Carbón tostado
f	Función diferencial o derivada
g	Gramos
Hz	Hertz
Hg	Mercurio
Hrs	Horas
Kg	Kilogramos
L	Litros
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
mg	Miligramos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
Ni	Número de yodo
Nm	Nanómetros
P	Presión de equilibrio
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
rp	Radio de poro
tons	Toneladas

# INTRODUCCIÓN

## **INTRODUCCIÓN**

El carbón activado ha llegado a ser uno de los adsorbentes más importantes y más ampliamente usados, debido a su gran variedad y capacidad de adsorción. Su origen puede partir de la activación del carbón natural, o de la carbonización de productos animales o vegetales.

Dadas las importantes características de adsorción que presentan los carbones activados, constantemente se registran incrementos notables en su consumo, diversificándose sus aplicaciones en el campo de la tecnología química.

Las características de los C.A. están determinadas por diferentes factores del proceso de activación. Debido a esto, es conveniente incrementar la investigación sobre este adsorbente, tomando en cuenta los diferentes métodos de elaboración de carbón activado y utilizando materiales carbonizables; en especial, aquellos que constituyen subproductos o desechos de la industria.

El uso del carbón activado para la adsorción de materiales en agua, ha llegado a ser firmemente demostrado como una práctica confiable para el control de contaminantes presentes en el agua. Este proceso es particularmente utilizado para la remoción de compuestos orgánicos y de metales (mercurio y plata).

Con base en lo expuesto el objetivo de este trabajo es la producción de carbón activado a partir de materiales de desecho económicos (coque de petróleo y cáscara de cacahuete) para la eliminación de mercurio en agua, contribuyendo con este estudio, a ser más viable la aplicación del proceso de adsorción, desde el punto de vista económico, para el tratamiento de aguas en México.

Esta tesis se constituye de cuatro capítulos. El capítulo 1 presenta una revisión bibliográfica de los aspectos teóricos sobre los procesos de activación y de

adsorción con carbón activado y sobre los aspectos más importantes del mercurio (propiedades, normatividad y métodos de remoción en agua).

El Capítulo 2 describe la metodología experimental aplicada para evaluar los procesos de activación de carbón y de adsorción de mercurio en reactor batch.

En el Capítulo 3 se presentan y discuten los resultados obtenidos en las pruebas de producción (caracterización fisicoquímica de los carbones activados producidos) y de adsorción de mercurio. Además se elaboró un estudio económico sobre la producción de carbón activado a partir de coque de petróleo y cáscara de cacahuete.

Finalmente el Capítulo 4 presenta las conclusiones y recomendaciones que se desprenden de este estudio.

# CAPÍTULO 1

## REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

## 1. - REVISION BIBLIOGRAFICA

### 1.1 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL PROCESO DE ADSORCION

El proceso de adsorción fue observado por primera vez para el tratamiento de gases en el año de 1773 por C.W. Scheele y, luego para líquidos por Lowitz en el año 1785 (Kraemer, 1930). Actualmente, se reconoce como un fenómeno importante para la mayor parte de los procesos físicos naturales, biológicos y químicos. La adsorción sobre sólidos, particularmente carbón activado, ha llegado a utilizarse ampliamente para la purificación de agua potable y aguas residuales.

#### 1.1.1. – Definición y tipos de adsorción

Adsorción: Proceso en el cual una capa de átomos o moléculas de una sustancia se forma en la superficie de un sólido o líquido. La capa, adsorbida puede retenerse en la superficie por enlaces químicos (adsorción química) o, por las fuerzas débiles de Vander Waals (adsorción física).

**Adsorción física:** - Este tipo de adsorción no es específico y es similar al proceso de condensación. Las fuerzas que atraen a las moléculas del fluido a la superficie del sólido generalmente son débiles, y el calor desprendido durante el proceso de adsorción es del mismo orden de magnitud que el calor de condensación.

La energía de activación de la adsorción física es, por lo general, inferior a 1 Kcal/gmol. El grado de adsorción física disminuye con rapidez a medida que la temperatura aumenta.

Las energías que mantienen adsorbidas a las moléculas del adsorbato, para la fisisorción, es semejante a los calores de condensación. No existe intercambio de

electrones entre adsorbente y adsorbato, lo que permite que el proceso sea reversible.

**Adsorción química:**- Las moléculas adsorbidas se retienen en la superficie por medio de fuerzas de valencia del mismo tipo que se presentan entre átomos en las moléculas. Taylor (Weber, 1979) sugirió el nombre de quimisorción para denominar la adsorción química.

El número de capas que cubren la superficie del adsorbente, está restringida a una capa de espesor monomolecular, pues para que exista enlace químico debe haber contacto íntimo entre las moléculas del adsorbato y las del adsorbente. Este tipo de adsorción suele ser irreversible debido a que ocurren modificaciones en las estructuras químicas del adsorbato y del adsorbente.

Una característica importante de la quimisorción es que su magnitud no excederá de manera apreciable a la que corresponde a una capa monomolecular. Esta limitación se debe al hecho de que las fuerzas de valencia que retienen a las moléculas en la superficie, disminuyen rápidamente con la distancia.

La mayor parte de los fenómenos de adsorción son combinaciones de las dos formas de adsorción; es decir, las distintas fuerzas que actúan en los tipos diferentes de adsorción, a menudo interaccionan dando lugar a la concentración de un soluto determinado en una interfase. De hecho no es fácil distinguir entre adsorción física y química.

En el proceso de adsorción hay dos aspectos que debemos de considerar; la cinética y el equilibrio. El primero nos da una idea del tiempo de contacto necesario entre adsorbente y solución; y el segundo, la capacidad de adsorbente, que es una medida de la vida útil del carbón activado.



En los estudios de adsorción generalmente se mide:

1. La capacidad de adsorción.
2. Para la adsorción de gases la presión de equilibrio  $P$ , que frecuentemente se expresa como presión relativa  $P/P_0$ , en la cual  $P_0$  es la presión de saturación a la temperatura de trabajo.
3. La temperatura.

Esas medidas pueden correlacionarse de varias formas:

Si a temperatura constante se correlaciona la cantidad adsorbida  $v$ , como función de la presión de equilibrio  $P$ , se obtiene la isoterma de adsorción.

$$V = f(P), T = \text{constante.}$$

Si a la presión constante se correlaciona la cantidad adsorbida  $v$ , como función de la temperatura, se obtiene

$$P = f(T), P = \text{constante.}$$

Si una cantidad adsorbida  $v$  constante, se correlaciona la presión de equilibrio  $P$ , como función de la temperatura, se obtiene

$$P = f(T), V = \text{constante.}$$

## **Parámetros que influyen en las propiedades de adsorción (Smith, 1977)**

### **1. Cinética y capacidad de adsorción**

Los parámetros de capacidad determinan las características de adsorción del carbón (concentración del adsorbato en la superficie del carbón). La capacidad máxima de adsorción del carbón es alcanzada en el punto de equilibrio.

Los parámetros cinéticos caracterizan la velocidad de adsorción y tienen un efecto poco significativo sobre el valor de la capacidad de adsorción.

### **2. Área específica**

La capacidad de adsorción es proporcional al área de intercambio (la cual está determinada por el grado de activación del carbón).

El área específica puede definirse como la porción del área total que está disponible para la adsorción. Por lo tanto, la cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente sólido es tanto mayor, cuanto más finamente dividido y poroso esté el sólido.

### **3. Tamaño del poro**

La habilidad del carbón activado de adsorber grandes cantidades de material esta directamente relacionada a la naturaleza del poro, el tamaño del poro, el volumen del poro, el área superficial y con su distribución espacial dentro de la partícula del carbón. Se asume que el poro tiene forma cilíndrica. Existen diferentes clasificaciones para el tamaño y tipo de poro. A continuación, se presenta una de las más comunes (IUPAC).

Clasificación de los tamaños de poros.

Microporos	$r_p < 1\text{nm}$
Mesoporos	$1\text{nm} < r_p < 25\text{nm}$
Macroporos	$25\text{ nm} < r_p$

En donde  $r_p$  es el radio del poro.

La clasificación de los poros se fundamenta en diferentes métodos usados para varios rangos de poro, con diferentes mecanismos de fase de adsorción de vapor, basados en cada rango de tamaño corresponde a los efectos característicos de adsorción que se manifiestan en la isoterma.

En los microporos, el vapor de adsorción se caracteriza por que el volumen llenó el espacio de adsorción, ya que los poros y el adsorbato son de dimensiones similares; además en los microporos la interacción potencial es significativamente más grande que en los poros anchos debido a la proximidad de las paredes, y la cantidad adsorbida se aumenta correspondientemente.

En los mesoporos ocurren la condensación capilar con características de las curvas de histéresis (de fricción interna), donde se da la adsorción inicial y la adsorción mono y multicapa. Por que el espacio del poro no ocupado es de dimensión similar a la molécula del adsorbato y es llenado por la alta presión del vapor.

En los macroporos, la adsorción de mono y multicapa ocurren, pero la condensación no se observa por lo que los poros son demasiado grandes y anchos.

#### 4. Tamaño de las partículas

El tamaño de las partículas no afectan a la capacidad de adsorción sino únicamente a la velocidad, de tal manera que se espera una dependencia de la velocidad de adsorción y el tamaño de la partícula cuando el sistema está alejado del equilibrio.

## 5. Temperatura

Las reacciones de adsorción son normalmente exotérmicas, por lo tanto, el grado de adsorción suele aumentar al disminuir la temperatura. Las variaciones de entalpía en la adsorción suelen ser del orden de las correspondientes a las reacciones de condensación o cristalización. Así, pequeñas variaciones de temperatura no alteran significativamente el proceso de adsorción.

La cantidad total de energía calorífica utilizada en la adsorción de una cantidad definida de soluto sobre un adsorbente, se llama calor de adsorción (Weber, 1979).

## 6. Concentración del adsorbato

La capacidad de adsorción es proporcional a la concentración del adsorbato (concentraciones altas proveen fuerzas impulsoras de mayor magnitud para el proceso de adsorción).

## 7. pH

En ciertos casos la capacidad de adsorción aumenta en condiciones de pH bajo con el cual se disminuye la solubilidad del adsorbato.

## 8. Tiempo de contacto

Se requiere tiempo de contacto mínimo para alcanzar el equilibrio de adsorción para de esta manera, maximizar la eficiencia de adsorción.

## 9. Cenizas

La ceniza es un componente inerte de carbón que reduce la actividad total del carbón.

## 10. Densidad aparente

Esta es significativamente más baja que la densidad sólida teórica y se usa para indicar la masa de actividad de un carbón (la masa de actividad es proporcional a la densidad aparente).

### **1.1.2. -Modelos de equilibrio: cinética e isothermas de adsorción.**

#### **Cinética**

El equilibrio de adsorción se verifica cuando no ocurren cambios de la concentración del adsorbato, tanto en la fase sólida como en la líquida, durante un tiempo de contacto suficientemente largo. Este fenómeno no es instantáneo debido a que las moléculas primero deben de difundirse hacia la superficie interna del adsorbente.

Esta velocidad de acercamiento al equilibrio es denominada cinética de adsorción y está limitada por la transferencia de masa y depende de las propiedades del adsorbato y del adsorbente.

El desarrollo de ecuaciones que describen la cinética de adsorción es largo y complejo. Estas ecuaciones se derivan de expresiones de velocidad de transferencia de masa y de balances de masa y se basan en las siguientes suposiciones:

- La adsorción ocurre bajo condiciones isotérmicas y es un proceso completamente reversible
- Mecanismo de transferencia de masa dentro del adsorbente puede ser descrito como un proceso de difusión.
- El adsorbente es esférico e isotrópico.
- El volumen de solución cercano a una partícula de adsorbente dado está completamente mezclado

### **Equilibrio de adsorción**

En el equilibrio, existe una distribución definida de soluto entre las fases líquida y sólida. La relación de distribución es una medida de la posición del equilibrio en el proceso de adsorción, y puede ser una función de la concentración del soluto, concentración y naturaleza de los solutos competitivos, naturaleza de la solución.

La forma más utilizada para describir esta distribución consiste en determinar la cantidad " $q_e$ " como una función de  $C$  a una temperatura fija. La cantidad " $q_e$ " es la cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso del adsorbente, y  $C$  es la concentración del soluto que permanece en solución en el equilibrio. Una expresión de este tipo se llama isoterma de adsorción.

La isoterma de adsorción es una función matemática que describe la variación de la capacidad de adsorción con respecto a la concentración de adsorbato en la masa principal de la solución, para una temperatura constante. Los datos de equilibrio de adsorción que son obtenidos a una temperatura constante son utilizados para obtener isotermas de adsorción en el equilibrio.

La relación más común entre  $q_e$  y  $C$  se obtiene para los sistemas en que la adsorción desde la solución da lugar a la deposición de una capa simple aparente de moléculas de soluto sobre la superficie del sólido.

Los modelos que describen el grado de adsorción sobre carbón activado, definen la distribución de soluto entre las bases sólidas y líquidas. Así, el grado de distribución es una medida de la posición del equilibrio, la cual es función de la concentración de soluto en la solución, la concentración y naturaleza de otros solutos, pH, la temperatura, etc.

Una isoterma es insuficiente para hacer la selección definitiva del mejor adsorbente, ya que éstas no describen la velocidad de la adsorción.

Las pruebas para obtener isotermas deben realizarse a una temperatura constante y que coincida con aquella que se tendrá en la aplicación industrial. La razón es que dicha variable afecta la solubilidad del soluto y, por lo tanto, cambia la concentración en el equilibrio. Por esta razón, a los resultados obtenidos se les llama isotermas.

Una isoterma puede expresarse gráficamente y es función de distintas variables. Si a estas variables se les da un adecuado manejo matemático, en muchos casos es posible obtener una línea recta. Esta recta hace muy práctico el manejo de la información, ya que la ecuación que la describe solamente tiene dos constantes.

La isoterma se utiliza en el estudio de la capacidad de adsorción de todo tipo de adsorbentes. Para el caso específico del carbón activado en fase líquida, la ecuación de Freundlich (Smith, 1979), generalmente es la isoterma más utilizada de entre aquellas que tienen dos parámetros, debido a que es la que describe los datos experimentales de manera satisfactoria en la mayoría de los casos y, en un rango de concentraciones amplio.

La relación de equilibrio para la adsorción de los componentes más típicos del agua y del agua residual no es lineal; de hecho, la distribución de equilibrio del adsorbato entre el adsorbente y la masa principal de la solución puede presentarse con bastante aproximación por la ecuación de equilibrio de Langmuir para la mayoría de

sustancias orgánicas de interés en la aplicación de tratamientos del agua y agua residual.

### 1.1.2.1. Isotherma de adsorción de Langmuir

Irving Langmuir (1918) propuso un modelo sencillo para describir el fenómeno de adsorción, que en particular es muy útil para la quimisorción, y que le condujo a establecer teóricamente y de forma muy elemental, una isoterma de adsorción que ha resultado ser de extraordinaria importancia.

La isoterma de Langmuir puede deducirse a partir de consideraciones cinéticas o termodinámicas de adsorción.

La deducción a partir de bases termodinámicas es algo más sofisticada, aunque menos intuitiva, que el principio cinético, ya que se hacen menos suposiciones.

El modelo de Langmuir se basa en las suposiciones de que la adsorción máxima corresponde a una monocapa saturada de moléculas de soluto sobre la superficie del adsorbente, que la energía de adsorción es constante, y que no existe transmigración de adsorbato en el plano de superficie. Las ecuaciones finales de las isotermas de adsorción para líquidos y gases se presentan a continuación.

$$PV = (1/V_m)P + (a/V_m) \dots\dots \text{gases.}$$

V = volumen adsorbido por una cantidad de adsorbente.

V<sub>m</sub> = volumen necesario para formar una monocapa.

$$\theta = V/V_m$$

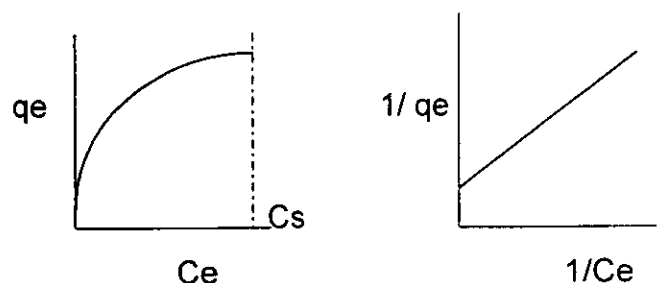
$$q_e = (1/q_m) + (1/q_m * b)^* (1/C_e) \dots\dots\dots \text{Líquidos (forma I).}$$



$$q_e = q_m \cdot b \cdot C_e / (1 + b \cdot C_e) \dots\dots\dots \text{Líquidos (forma II)}.$$

Cualquiera de estas ecuaciones pueden utilizarse para obtener la representación lineal de los datos que siguen una ecuación de Langmuir. La forma escogida depende generalmente del rango y extensión de los datos.

La representación grafica del modelo de absorción de Langmuir se representa en las siguientes figuras



**Figura 1.1 Isoterma típica para el modelo de adsorción de Langmuir**

Donde Cs representa la concentración de saturación del soluto en solución, a una temperatura determinada.

Aunque las suposiciones básicas explícitas en el desarrollo del modelo de adsorción de Langmuir no se cumplen totalmente en la mayoría de los sistemas de adsorción utilizados en el tratamiento del agua y del agua residual, la ecuación correspondiente de Langmuir ha resultado muy útil para describir los datos de equilibrio en estos sistemas.

La ecuación de Langmuir puede utilizarse para describir condiciones de equilibrio de adsorción y calcular los parámetros ( $q_m$  y  $b$ ) con los cuales podemos comparar el

comportamiento a la adsorción de diferentes sistemas adsorbato adsorbente, o para otras condiciones dentro de un sistema dado (Grosso, 1997).

### 1.1.2.2. Isotherma de adsorción de Freundlich

La ecuación de Freundlich (Smith, 1977), es una ecuación empírica válida en pequeños intervalos de concentraciones, particularmente útil para soluciones diluidas y, representa la variación de la cantidad de adsorción por unidad de área de la masa, esta ecuación tiene la forma:

$$q_e = K C^{1/n}$$

$q_e$  = peso del soluto adsorbido por unidad de área o de masa de adsorbente.

$C$  = concentración del soluto en la disolución en equilibrio.

$K, n$  = constantes empíricas.

La ecuación de Freundlich es básicamente empírica pero es un instrumento útil para describir los datos de adsorción. Los datos se ajustan generalmente a la forma logarítmica de la ecuación (Grosso, 1997).

$$\text{Log } q_e = \text{log } K + 1/n \text{ log } C$$

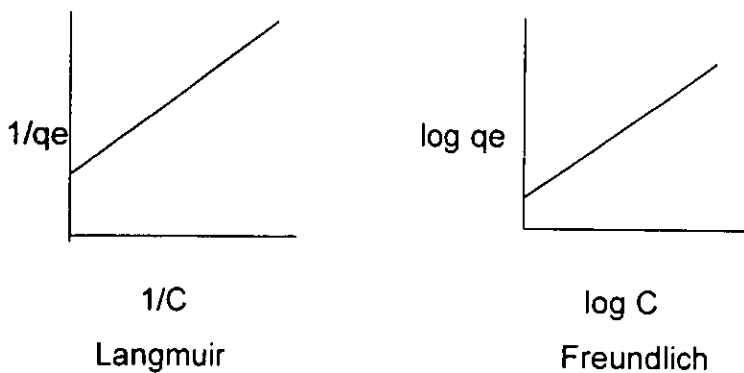
Esta ecuación es una línea recta con pendiente  $1/n$  y ordenada en el origen igual al valor de  $\text{log } K$  para  $C = 1$  ( $\text{log } C = 0$ ), la ordenada en el origen es una indicación aproximada de la capacidad de sorción y la pendiente,  $1/n$ , de la intensidad de adsorción.

La ecuación de Freundlich concuerda bastante bien con la ecuación de Langmuir para datos experimentales dentro de un intervalo de concentración,  $C$ , moderado. Al contrario de la ecuación de Langmuir, para pequeñas concentraciones (muy bajas) no se obtiene una expresión lineal para la adsorción.

La isoterma de Freundlich no concuerda bastante bien con la ecuación de Langmuir a muy bajas concentraciones, ya que  $n$  debe de alcanzar un valor límite cuando la superficie está totalmente cubierta.

La ecuación de Freundlich se suele utilizar para comparar carbones en polvo utilizados en el tratamiento del agua. La cantidad adsorbida,  $q_e$ , es igual a  $(C_0 - C)/Dm_0$ , siendo  $C_0$  la concentración del fenol u otro contaminante y  $Dm_0$  la dosificación de carbón, es decir, el peso por unidad de volumen.

En la figura 1.2 se observa la forma lineal que representa gráficamente las isotermas de Langmuir y Freundlich.



**Figura 1.2 Isotermas de Langmuir y Freundlich.**

## 1.2 CARBON ACTIVADO (CA): principal adsorbente utilizado en el tratamiento de agua

El Carbón Activado es un excelente adsorbente que ha sido utilizado exitosamente durante siglos: al principio en forma de polvo para propósitos medicinales y purificación del alcohol; más tarde en forma granular durante la primera Guerra

Mundial en las máscaras antigases y más recientemente para la recuperación de solventes (Grosso, 1997).

La estructura única en su género del carbón activado produce una superficie enorme (700 – 1000 m<sup>2</sup>/g). El carbón activado se puede producir a partir de una gran variedad de materias primas carbonáceas. Los carbones primarios derivan del carbón mineral. Otros de la cáscara del coco, de la madera y de lignitos. Las propiedades intrínsecas del carbón son muy dependientes de la materia prima utilizada para su producción.

### **1.2.1 - Definición**

El carbón activado es un sólido predominantemente amorfo que tiene una gran cantidad de poros internos y, por lo tanto una gran área específica. Estas características únicas son responsables de su capacidad de adsorción (Kirk, 1961).

La estructura del CA se describe mejor como una malla cruzada de capas planas de carbón defectuoso, con enlaces cruzados por grupos de enlaces alifáticos. Estos grupos permanecen amorfos debido a que la malla de enlaces cruzados al azar inhiben el reordenamiento de la estructura.

Generalmente se considera que el CA exhibe una baja afinidad por el agua, lo cual constituye una importante propiedad con respecto a la adsorción de gases en presencia de humedad.

El CA es un polímero complejo formado por microcristales unidos por sus extremos en los cuales existen dos posibles lugares donde un soluto puede adsorberse; sobre los planos, o en los bordes de los microcristales.

Estos dos sitios tienen diferentes propiedades; las superficies planas son probablemente de naturaleza más uniforme, con poca posibilidad de grupos funcionales debido a que los electrones en los átomos de carbón están compartidos por los enlaces covalentes entre ellos.

Los distintos tipos de carbón presentan dos características comunes:

- a) Tiene grupos orgánicos superficiales que se forman por adición a lo largo de la vida del carbón, desde el proceso de carbonización, durante el enfriamiento posterior a la misma, y también mientras se almacena y se utiliza. Esta formación ocurre cuando existe oxígeno en el agua o en la atmósfera que rodea el carbón. Los grupos pueden tener carácter ácido o básico dependiendo de las condiciones de las etapas mencionadas
- b) Poseen la propiedad de adsorber, que consiste en un fenómeno fisicoquímico en el que un sólido, llamado adsorbente, atrapa en sus paredes a cierto tipo de moléculas, llamado adsorbatos, y que están contenidas en un líquido o un gas.

La diferencia fundamental entre uno y otro tipo de carbón radica en la estructura o arreglo de sus átomos.

En el caso del carbón activado, existen dos clases: los que se activan térmicamente –son los más comunes – y los que se activan por deshidratación química.

Por lo tanto, la capacidad de un carbón activado para retener una sustancia determinada, no sólo está dada por su área específica, sino por la proporción de poros cuyo tamaño debe ser el adecuado: una a cinco veces el diámetro de la molécula de dicha sustancia.

Hay que mencionar que todo tipo de moléculas orgánicas se adsorben bien en el carbón activado, no así los inorgánicos, excepto algunos como los molibdenos, los cianuros de oro, el cloruro de mercurio y sales de plata entre otros.

- La adsorción de orgánicos es más fuerte al aumentar su peso molecular, mientras el tamaño de las moléculas no rebasa el del poro.
- Las moléculas orgánicas no polares se adsorben con mayor fuerza que las lineales.
- Las moléculas orgánicas ramificadas se adsorben con mayor fuerza que las lineales.
- La mayoría de las moléculas orgánicas que tienen ligados átomos de cloro, bromo o yodo adsorben con mayor fuerza.
- La adsorción en la fase líquida aumenta al disminuir la solubilidad del adsorbato.

### **Forma física y tamaño de carbón**

El carbón activado puede tener forma de gránulos irregulares, polvo, pelets o fibras. Los tres primeros son los más comunes, aunque los pelets son normalmente cilindros, también se producen con otras formas.

En todos los casos, aun cuando la forma física difiera, el producto básico es el mismo y, por lo tanto, trabaja con el mismo principio (Grosso, 1997).

### **El carbón activado granular (CAG)**

El CAG consiste en gránulos de forma irregular, se fabrica en diversos rangos de tamaño. La especificación de malla que se utiliza con mayor frecuencia es la estándar americana (U.S. std. Sieve). En el caso de tratamiento de aguas los tamaños más utilizados son: 8 x 30.

### **El carbón activado en polvo (CAP)**

Las partículas del CAP pasan a través de la malla 80.

### **El carbón activado peletizado.**

El carbón activado puede pulverizarse y posteriormente peletizarse bajo presión o con la ayuda de agentes ligantes, como brea, alquitranes y glucosa, entre otros.

Los pelets suelen ser cilíndricos debido a que normalmente, se producen por extrusión. Su principal ventaja consiste en que causan una menor caída de presión que los carbón granulares, cosa que los hace muy útiles en la purificación de aire y otros gases en los que existe una baja presión disponible.

### **1.2.2.-Procesos de producción de carbón activado**

Para comprender el proceso de producción de C.A. es necesario empezar por describir la diferencia estructural entre los distintos tipos de carbón que se encuentran en la naturaleza o que fabrica el hombre independientemente de que sean o no activados.

El proceso de activación, generalmente una oxidación, se inicia con el ataque a los grupos funcionales, formándose así los macroporos. Enseguida, el ataque se concentra en los planos de los cristales, formando los microporos.

Cuando existen materias inorgánicas en el carbón esto produce esfuerzos estructurales en el sólido, lo cual lo vuelve más susceptible de ataque y más activo este lugar de la superficie (Banzal, *et al*, 1988).

La naturaleza de estos grupos funcionales depende del tipo de materia prima que se utilice, del método de activación y de las impurezas que existan en la materia prima. Los métodos para la obtención de un producto de la porosidad y purezas adecuadas, son de tipo físico-químico y generalmente pertenecen, a dos grupos diversos según el medio de activación.

### **Activación**

El objetivo del proceso de activación es aumentar el volumen y agrandar el diámetro de los poros para crear alguna nueva porosidad. La estructura de los poros y su tamaño de distribución del poro son en gran parte determinados por la naturaleza del material puro y del proceso de carbonización (Banzal *et al*, 1988).

La activación está diseñada para desarrollar una estructura porosa dentro del residuo pirolizado; durante esta etapa se consume aproximadamente el 50% del carbón residual. Los poros se forman por quemados u oxidación de segmentos superficiales en los paquetes de los planos grafiticos o por pérdida, rotura, o ciclación de los grupos terminales menos estables.

Según Dubinin y Zaverina (1976) los macroporos del carbón activado son producidos cuando la extensión quemada es menos del 50% y los macroporos del carbón activado cuando la extensión quemada es mayor 75% (Banzal, *et al*, 1988).

Aunque el mecanismo exacto del proceso de activación no se ha podido determinar, se puede visualizar una interacción entre el agente activante y los átomos del carbón que forma la estructura del producto intermedio carbonizado.

Los átomos de carbón difieren unos de otros en su reactividad dependiendo de su arreglo espacial. Los átomos de carbón que son localizados en los bordes y periferia de la cubierta aromática o se localizan en una posición disertada y deslocalizada o



discontinua son asociados con electrones impares o tienen valencias residuales y son ricos en energía potencial.

El procedimiento exacto para activación de carbones son secretos protegidos por los fabricantes. Sin embargo, los métodos más comúnmente empleados son en general divididos en dos principales tipos: activación química y activación física. En el proceso de activación química, la activación y la carbonización son realizados en un solo paso para llevar a cabo la descomposición térmica del material puro impregnado con ciertos agentes químicos. La activación física concierne la carbonización con la gasificación de la masa del carbón activado por oxidación con vapor de agua o dióxido de carbono en un rango de temperaturas de 850 – 1100°C. En este caso la carbonización y activación son realizadas en dos diferentes pasos.

Los carbones activados son comúnmente caracterizados por el proceso de activación porque este es el proceso, en el cual uno de los reactantes –material carbonoso- es transformado en uno de los productos- el carbón activado. De esa manera, se obtiene el carbón activado por activación química será llamado carbón químico y, los obtenidos por activación física son llamados carbones físicos.

Cuando se parte de un material orgánico –madera, gabazo de caña, cáscara de cacahuate, sangre o algún otro-(Grosso, 1997), el proceso se inicia con su carbonización, la cual debe realizarse a una temperatura baja en la que no se favorezca la grafitación. Si se parte de carbón mineral, normalmente no se requiere de la carbonización, a menos que éste contenga un alto contenido de volátiles. Otra característica de los carbones minerales consiste en que suele ser necesario un lavado previo, para extraer contaminantes como azufre y metales pesados, que generalmente se encuentran en los yacimientos.

El carbón resultante se somete a temperaturas cercanas a 1000°C, en una atmósfera inerte o reductora. En estas condiciones, y a lo largo de un cierto tiempo, algunos átomos de carbón reaccionan y se gasifican en forma de CO<sub>2</sub> y otros se

recombinan y condensan en forma de las mencionadas placas gráficas. Estas placas tienden a ser pequeñas e imperfectas, y el tamaño y grado de imperfección dependen de la materia prima.

El grado de activación y el rendimiento dependen de las condiciones de operación del horno de activación, que son la temperatura de composición de los gases el tiempo de residencia del carbón en el equipo y su flujo volumétrico.

Por grado de activación se entiende el área superficial generada en el CA.

A mayor grado de activación generalmente corresponde un menor rendimiento.

#### **1.2.2.1 Activación química**

Este método sólo puede aplicarse a ciertos materiales orgánicos relativamente blandos y que están formados por moléculas de celulosa, como es el caso de la madera de pino.

La activación química normalmente se realiza cuando el material puro es de origen vegetal. Al principio, el material es impregnado con agentes activantes en la forma de soluciones concentradas normales, con el fin de realizar la degradación del material celuloso.

En ésta etapa se deshidrata la materia prima mediante la acción de un agente activante químico, como ácido fosfórico, cloruro de zinc o carbonato de potasio.

Posteriormente, se carboniza el material deshidratado a baja temperatura de (500 a 600°C), obteniéndose automáticamente la estructura porosa.

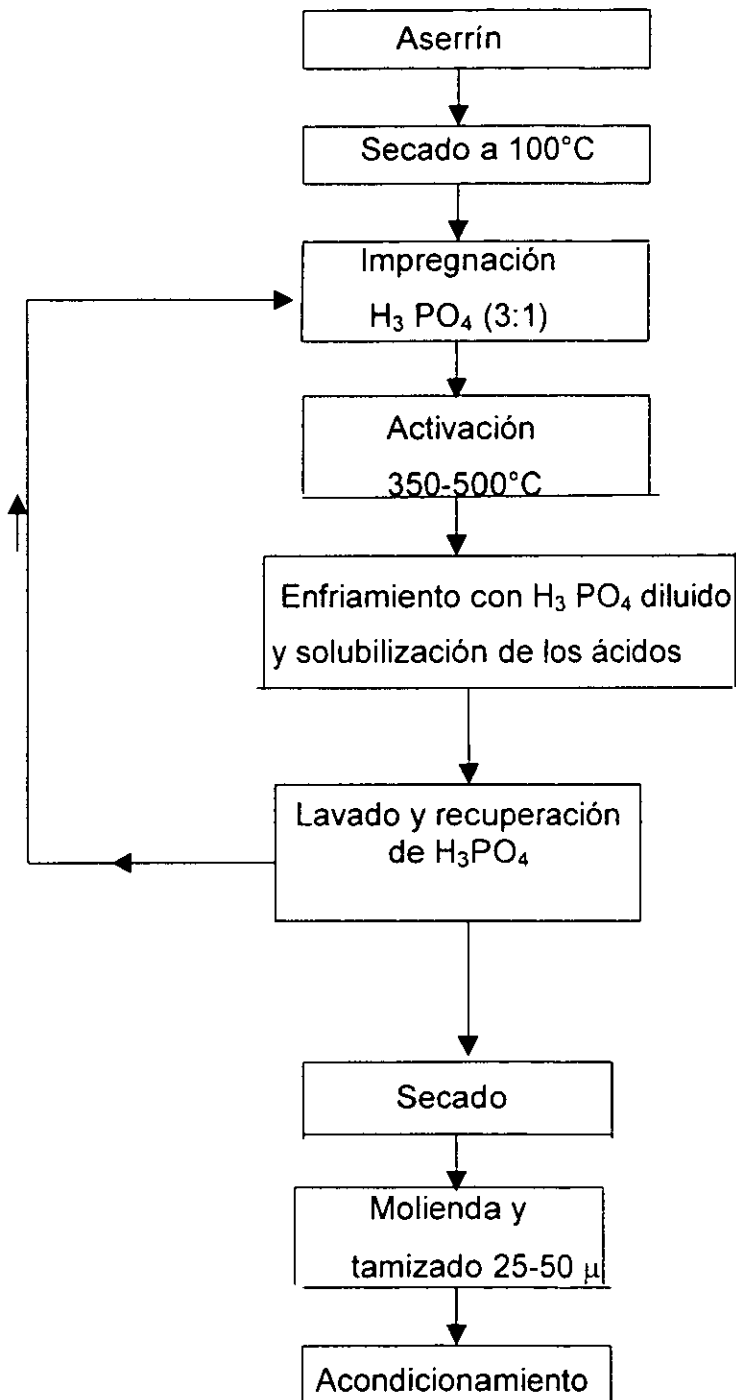
El material impregnado con el agente químico activante es colocado en el horno rotatorio, para llevar a cabo la pirólisis entre 400 y 600°C en ausencia de aire. El producto de la pirólisis es enfriado y lavado para remover el agente activante, el cual es reciclado. La rentabilidad del proceso radica en gran medida en la eficiencia de dicha recuperación.

El grado de activación puede variar de acuerdo con la concentración del agente químico deshidratante utilizado.

Los agentes activantes más usados son ácido fosfórico, cloruro de zinc y ácido sulfúrico, aunque también se emplean el sulfato de potasio, hidróxido de tiocianato de potasio, cloruro de calcio y de manganeso. La característica común de estos agentes activantes es que son sustancias deshidratantes. Ellos también disminuyen la formación de ácido acético, metanol, etc., y aumentan el rendimiento del carbón.

La activación química normalmente se realiza a temperatura entre 400 a 800°C. Cuando el cloruro de zinc es el agente activante, la temperatura óptima está entre 600 – 700°C. Estas temperaturas son más bajas que las utilizadas en el proceso de activación física y, por lo tanto, el desarrollo de la estructura de los poros es mejor en el caso de la activación química. La distribución del tamaño del poro en el carbón final producido es determinado en gran parte por el grado de impregnación.

En el caso de aserrín el agente activante más comúnmente usado es el ácido fosfórico, como se ilustra en la figura 1.1.



**Figura 1.1** Diagrama de bloques para la activación química de aserrín (Banzal, et al, 1988).

Los carbones activados químicamente y obtenidos en forma de polvo son productos que presentan una alta actividad y capacidad de adsorción. Estos adsorbentes son usados para la adsorción de moléculas grandes, por ejemplo ácido húmicos y fúlvicos.

Kadlec (1972), observó que la forma de los poros en el carbón activado es diferente cuando son obtenidos por métodos de activación químico y físico. Los poros son usualmente en forma de botella en el caso de activación química y en forma de cono en activación física.

Kwok y Miller (1978), propusieron un método de preparación química del carbón activado a partir coque de petróleo tratado con un ácido polifosfórico que contienen un equivalente  $P_2O_5$ , de 75% en peso.

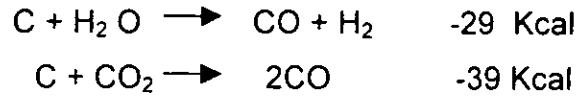
El ácido fosfórico- el coque tratado es activado a una temperatura entre 700 y 900°C, la pérdida de peso es más o menos del 30%. El área superficial del carbón activado así obtenido es más o menos de 700 m<sup>2</sup>/g.

#### **1.2.2.2. Activación física.**

La aplicación del proceso de activación física directa permite desarrollar una importante área específica y una estructura de poros de dimensiones moleculares, más bien se asemejan a una molécula orgánica, parte aromática y parte alifática, o aun polímero muy ramificado y entre ligado. El método es realizado generalmente entre 800 y 1100°C en la presencia de un gas oxidante tal como vapor de agua sobrecalentado, dióxido de carbono, aire, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> o alguna mezcla de estos gases.

La extensión de la gasificación depende de la naturaleza del gas empleado y de la temperatura de activación.

La gasificación del material carbonizado con vapor y dióxido de carbono ocurre por las siguientes reacciones endotérmicas.



En estas condiciones, y a lo largo de un cierto tiempo, algunos átomos de carbón reaccionan y se gasifican en forma de CO<sub>2</sub>, y otros se recombinan y condensan en forma de las mencionadas placas gráficas.

Debido a que la reacción de carbón con vapor y con dióxido de carbono son ambas endotérmicas, el proceso de activación se debe llevar a cabo con un preciso control de las condiciones en el horno.

El CA puede producirse a partir de todo tipo de material carbonáceo o bien a partir de cualquier carbón mineral no grafitico, sin embargo, cada materia prima brindará características y calidades distintas al producto.

Cuando puede activarse una misma materia prima, tanto térmicamente como por deshidratación química, el CA producido por la segunda tecnología adquiere poros cuyo tamaño es un poco mayor.

Como se ha mencionado, el CA puede fabricarse a partir de un sinnúmero de materiales carbonáceos, pero se utilizan unos cuantos a nivel comercial, debido a su disponibilidad, bajo costo y a que los productos obtenidos a partir de ellos tienen las propiedades que cubren toda la gama de aplicaciones que el CA puede tener.

En resumen, los métodos de producción de carbón activado se puede dividir en dos grupos según el medio de activación, los cuales se encuentran listados a continuación:

<b>Método 1 (activación gaseosa)</b>	<b>Método 2 (activación química)</b>
Tratamientos previos de la materia prima (molienda, tamizado).	Tratamientos previos de la materia prima (molienda, tamizado).
Carbonización a temperatura de 800 a 1000°C, con CO <sub>2</sub> , vapor.	Activación por impregnación de las sustancias activantes (ZnCl <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) a un tiempo y temperatura seleccionada, sobre la materia prima.
Activación con el gas precalentado sobre el material carbonizado a tiempo y temperaturas seleccionadas.	Carbonización del material impregnado con el activante a temperatura y tiempos seleccionados.
Lavado del carbón activado y molido según se requiera.	Molido y lavado del carbón obtenido, según se requiera.
Secado y empaclado.	Secado y empaclado.

### **1.2.3. Aplicaciones del carbón activado (CA)**

Las características del carbón activado le permiten tener un gran número de aplicaciones en procesos de separación tanto en fase líquida como en fase gas.

En el caso de los procesos de separación en fase líquida, se utiliza tanto el CA en polvo como el granular y, en casos muy particulares, también el peletizado. Entre las principales aplicaciones están la remoción de:

- Impurezas que causan color, olor y sabor en:
  - Agua potable (ejemplo: potabilizadoras, refresqueras, purificadores, caseros, municipales).
  - Líquidos de procesos químicos (ejemplos: solventes y fármacos).
  - Otros líquidos alimenticios (ejemplos: jugos, vinos, vinagres, destilados)
- Compuestos orgánicos tóxicos y metales ligados a moléculas orgánicas en aguas residuales de origen municipal o industrial.
- Tratamiento de agua y de líquidos en general, a nivel industrial o municipal.
- Precursores de color que pueden no tener color original, pero que lo causan en una etapa posterior del proceso o después de que el producto se ha empacado o vendido (ejemplo: glucosa de maíz).
- Acondicionamiento de aire, purificación de gases (como CO<sub>2</sub>, He, acetileno), recuperación de vapores de solventes, campanas para cocinar.

El CA en polvo se utiliza como agente para mejorar la floculación. También se utiliza en tratamientos secundarios, donde además de su capacidad adsorbente, se utiliza como agente de sedimentación de los lodos.

### **Procesos de regeneración**

La regeneración consiste en devolver al carbón su capacidad adsorbente mediante la remoción del compuesto adsorbido en la superficie del adsorbente. Existen varios métodos para lograr esto.



El primero se lleva a cabo por medios químicos, lo cual resulta significativamente costoso, por lo que sólo en ciertos casos este procedimiento es económicamente viable. El segundo consiste en desorber el contaminante del carbón saturado con un volumen pequeño de agua, lo cual lleva a concentrar el soluto con fines de recuperarlo.

Cuando las partículas de un carbón presentan un color entre blanco y gris claro, lo más probable es que se encuentran envenenadas o bloqueadas con carbonato o con hidróxido de calcio. En estos casos, la reactivación térmica no logra eliminar dichos compuestos: en cambio, un lavado en una solución ácida sí lo hace. Se puede utilizar cualquier tipo de ácido fuerte pero el clorhídrico es el más común (Grosso, 1997).

Este último método es el más utilizado, ya que elimina prácticamente todos los contaminantes orgánicos retenidos por adsorción física o química. También remueve algunos compuestos inorgánicos y destruye óxidos y grupos superficiales.

### **1.3. - EL MERCURIO**

Descripción.- Elemento químico; pertenece al grupo IIb de la tabla periódica y su estructura cortical externa es  $5d^{10}, 6s^2$ , líquido plateado; los compuestos son de muchos colores (todos los compuestos de mercurio son venenosos).

El mercurio es un metal de transición que aparece naturalmente como cinabrio (sulfuro de mercurio (II)) se quedó en la cristalización residual del magma y se ha separado a consecuencia de la volatilidad de su sulfuro, en yacimientos próximos a la superficie, en los que fue condensado por la acción refrigerante de la capa terrestre más externa (Duffy, 1983).

### 1.3.1 Propiedades físicas, químicas y toxicológicas del mercurio.

Símbolo: Hg.

Punto de fusión. ( p.f.) =  $-61^{\circ}\text{C}$ .

Punto de ebullición. (p.e ) =  $357^{\circ}\text{C}$ .

Densidad relativa. (d.r.) = 13.5

Número atómico. (n.a.) = 80

Peso atómico. (p.a.) = 200.59 g/mol

El mercurio es monoatómico, igual que los gases raros. Como el mercurio tiene, a temperatura ambiente una presión relativamente elevada, las superficies de mercurio se deben conservar siempre recubiertas para evitar su vaporización.

El mercurio es no reactivo. El vapor es muy venenoso. Se disuelve sólo en ácidos oxidantes como el nítrico, no se combina fácilmente, y muchas industrias utilizan mercurio en la fabricación de sus productos.

Funciona con los grados de oxidación (I) y (II), originando los compuestos mercuriosos y mercúricos, respectivamente. El estado de oxidación ( I ) es sólo aparente, ya que en realidad es un dímero formado por los iones Hg ( II ) unidos por enlaces covalente,  $^+\text{Hg} - \text{Hg}^+$ .

Se alea fácilmente con gran número de metales ( amalgamas); sin embargo, apenas lo hace con el hierro; por eso se comercializa y conserva en frascos de este metal.

Es el único metal líquido a la temperatura ambiente, debido a su gran tensión superficial tiende a dividirse en gotitas cuando se le esparce una superficie plana.

A temperatura ambiente conduce mal la corriente eléctrica, pero se convierte en excelente conductor en las proximidades del cero absoluto (superconductor). También a elevada temperatura, en estado de vapor, conduce la electricidad.

El mercurio se utiliza en termómetros, amalgamas especiales de dentisteria y en aparatos científicos, productos de limpieza, lámparas fluorescentes, pinturas, algunos compuestos químicos. Sus compuestos se utilizan como fungicidas, preservativos de madera y explosivos.

### **Toxicología**

El desarrollo industrial de los últimos años, ha aumentado el número de actividades profesionales generadoras de nuevos compuestos químicos que pasan a formar parte del medio laboral, exponiendo al hombre a distintos riesgos y peligroso y afectando, por tanto, a su salud. Estas sustancias presentes en el ambiente de trabajo penetran en el organismo humano a través de diversas vías, asimismo, el mercurio puede absorberse y presentar la siguiente toxicología por inhalación, ingestión y percutáneo ( Plunkett, *et al*, 1978).

Algunas patologías que se pueden presentar en las personas que inhalan e ingieren mercurio son:

- Inhibición de las enzimas celulares por combinarse con grupos sulfhidrilos.
- Congestión hepática, bronquitis erosiva y neumonitis.
- Atrofia cerebral y cerebelar.
- Necrosis de la mucosa gastrointestinal.

También pueden presentarse los siguientes signos y síntomas los cuales, se dividen en:

Agudos Ingestión: quemaduras en boca y garganta, sed, shock, arritmias cardíacas.

Crónicos | dolor de cabeza, vértigo, insomnio, temblores.

Gastrointestinales | aumento de la salivación, estomatitis, náuseas.

Respiratorios | tos, fiebre.

En el caso de ingestión de mercurio se aconseja tomar las siguientes medidas.

- Lavado gástrico si se ha ingerido con solución al 5% de sulfoxilato de formaldehído sódico luego con solución al 2% de bicarbonato sódico.
- Secuelas-cuando más grande sea la intoxicación, mayor es la lesión permanente.
- Ventilación adecuada.
- La limpieza de la planta debe ser meticulosa, y todo lo que se vierta debe de recogerse rápidamente.
- Todos los empleados deben de estar instruidos en los procedimientos adecuados para manejar el mercurio.
- No comer ni fumar en el área de trabajo.

### **1.3.2 Contaminación**

En la actualidad uno de los grandes problemas con que se cuenta, es el de la contaminación a continuación se muestran algunas industrias que han contaminado con Hg.

Minería de cinabrio y refinaria, recuperación del oro, productos farmacéuticos, instrumentos científicos, detonadores, fungicidas, insecticidas, catálisis, pinturas y baterías (Anglo, 1992).

### 1.3.3 El mercurio en agua

En 1976 una fuente anónima menciona que el valor medio de contenido de mercurio en la corteza terrestre es de 50 mg/Kg. Los valores máximos se encuentran localizados en las áreas mercuríferas de la superficie terrestre, y éstos coinciden con zonas calurosas, con la presencia de géiseres o terrenos volcánicos (Cátala *et al* 1971).

Tabla 1 Características del contenido de mercurio en la hidrosfera (Cátala, 1993).

Ambiente	Valores extremos (mg/Kg)	Valores medios (mg/Kg)
Agua de lluvia	0.05 - 0.50	0.20
Aguas normales de arroyos, ríos y lagos	0.01 - 0.10	0.30
Aguas cerca de depósitos de SHg.	0.50 - 100.00	
Océanos y mares	0.03 - 5.00	0.20
Fondos de causes normales	0.01 - 1.00	0.05

### 1.3.4 Normatividad

En México, la normatividad que se relaciona con la calidad del agua en función de sus usos está dada por los criterios Ecológicos de usos de agua que han servido como guía para el establecimiento de normas y políticas.

A continuación se muestran los parámetros permisibles en México.

Concentración máxima permisible 0.1 mg/m<sup>3</sup> en aire (Anglo, 1992).

Limite permisible de calidad del agua para uso y consumo humano 0.001mg/L.

Limite permisible de calidad del agua purificada envasada 0.001mg/L.

Las normas completas de estos límites permisibles se muestran en el anexo C.

## **Procesos de tratamiento de mercurio en agua.**

Los avances en la tecnología química y la creciente industrialización han provocado un aumento en el número de materiales indeseables en las aguas residuales, muchas de las cuales ofrecen fuerte resistencia a la biodegradación, que es el tratamiento más usado.

Algunos de estos métodos pueden ser, a rasgos generales, los siguientes: en primer lugar realizar un análisis de los flujos de residuos industriales líquidos producidos, y establecer los tratamientos químicos y biológicos apropiados para su neutralización con objeto de impedir cualquier tipo de impacto medioambiental.

### **Tratamientos físico-químicos**

Son procesos que no alteran químicamente las sustancias, sino que aíslan los productos peligrosos separándolos del resto de componentes del residuo industrial, para facilitar su posterior tratamiento.

Indicamos a continuación los procesos de separación más comúnmente empleados en el tratamiento de mercurio.

#### **a) Intercambio iónico**

El intercambio iónico es un proceso de tratamiento avanzado en el cual, iones de una especie dada son reemplazados de un material de intercambio insoluble por iones de una especie diferente en solución. El material de intercambio más comúnmente utilizado son las resinas sintéticas por su durabilidad.

Es una técnica mediante la cual se puede eliminar iones presentes en vertidos residuales. Para ello se hace pasar un flujo por unas resinas específicas para cada caso, en cuya superficie se produce el intercambio iónico entre iones de la resina e iones de la disolución con igual carga. Se emplea esta técnica especialmente para la remoción de iones metálicos.

Se elimina el cloro activado por filtración a través de carbón activado (también se disminuye la DQO). Obteniéndose como resultado un pH neutro y la disminución de mercurio de 250 ppb a 8 ppb.

#### **b) Adsorción por carbón**

La adsorción con carbón activado es un método avanzado para la remoción de compuestos orgánicos y cantidades residuales de compuestos inorgánicos tales como nitrógeno, sulfuros y metales pesados. Medios filtrantes granulares son comúnmente usados para remover los orgánicos solubles asociados con los sólidos suspendidos presentes en efluentes secundarios.

El carbón es un compuesto muy adsorbente; por ello, se utiliza para retirar sustancias contaminantes presentes en corrientes gaseosas y líquidas. Estas sustancias quedan fijas en la superficie del carbón al pasar por él la corriente de gas, saliendo éste último purificado del proceso.

Jodko y Spzopinski (1972) reportaron que el carbón activado preparado con  $ZnCl_2$  a  $650^\circ C$  adsorbe el dicloro de mercurio de una mejor manera que cuando se modifica por oxidación con  $HNO_3$  a  $250^\circ C$ .

Muchas investigaciones han reportado que disminuye el pH, la cantidad de mercurio removido incrementa. Wehman (1972) mostró que la capacidad de adsorción del mercurio se incrementó constantemente cuando el pH se disminuyó de 9 a 2. Thiem *et al* (1976) también notaron que la remoción de Hg(II) por carbón activado fue bastante sensible al pH.

Yoshida *et al* (1976 a, 1976b) investigaron las características de adsorción del Hg (II) sobre carbón activado preparado con varias materias primas y métodos de activación. Ellos observaron que el carbón activado preparado con madera, cáscara de coco y carbón activado con vapor tuvieron una alta capacidad de adsorción para el Hg(II) a un pH menor de 5 en un medio de ácido de HCl, pero la capacidad a valores de pH menores es baja. El carbón activado preparado con madera y activado con ZnCl<sub>2</sub> tuvo una alta capacidad de adsorción para Hg(II) a pH menores de 5. El carbón activado preparado por el método de vapor, adsorbió el Hg(II) principalmente por una adsorción irreversible acompañada de la reducción de Hg(II) sobre la superficie del carbón activado.

La aplicación de carbón activado para remover hierro fue reportado por Ford y Boyer (1973). Ellos explicaron que en presencia de carbón activado la oxidación de iones ferrosos fue acelerada acompañada con un sistema sin carbón activado. Los autores postularon además que el carbón puede actuar como catalizador para la oxidación de iones ferrosos.

Krishnan, *et al*, (1994), Korpiel y Vidic (1997) reportaron que el carbón activado remueve Hg eficientemente para flujo de gases, mientras que la remoción para agua subterránea es baja.

Ritter y Bibler (1992) reportaron que el proceso de adsorción de mercurio por intercambio de iones en resinas tiene una eficiencia de 30 – 40% y el pH disminuye, debido a una competencia de H<sup>+</sup> y Hg<sup>2+</sup>. La capacidad de adsorción de mercurio



sobre estas resinas es muy alta, con la posibilidad de obtener extremadamente agua purificada.

Biester *et al* (1999) investigaron las características de adsorción de Hg(II) sobre una capa musgosa de estaño en filtros. Presentan la combinación de Hg(II) reducido por otros metales tal como el estaño, como un método para la remoción de Hg(II) en agua subterránea. Los filtros presentan una capa musgosa de estaño fundido que es un material altamente efectivo para la reducción de la especie de Hg(II) en agua, es retenido en los filtros por la formación de una amalgama de HgSn.

### **c) Destilación**

Es una técnica que permite la separación de sustancias líquidas miscibles entre sí, debido a su diferente volatilidad.

En este proceso se utiliza hidracina como reductor, transformando la forma oxidada del mercurio a forma metálica. El líquido se filtra y el metal se recupera por destilación y condensación, teniendo como resultado la recuperación del mercurio en los vertidos del 96%.

## CAPÍTULO 2

# METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

## **2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

En este capítulo se presenta la metodología aplicada para la fabricación de carbón activado, a partir de dos materias primas económicas empleadas (coque de petróleo y cáscara de cacahuate). Asimismo, se describen los materiales, sistemas experimentales y técnicas analíticas para la producción de CA.

También se presenta el protocolo experimental utilizado en las pruebas de adsorción en reactor batch, de acuerdo a la técnica "point by point".

### **2.1 MATERIALES Y REACTIVOS**

#### **2.1.1. Proceso de producción de carbón activado**

El proceso de producción de carbón activado implica varias operaciones por lo que se debe de considerar todas las variables que intervienen en la elaboración, tales como:

- Tamaño de la partícula a carbonizar.
- Sustancias activantes
- Tiempo de contacto materia prima- activante
- Tiempo de carbonización.
- Temperatura de carbonización.
- Tiempo de secado.

Como se puede observar, para definir el método se requiere definir cada una de las variables y sus valores que permitan obtener las condiciones óptimas.

**Materias primas**

Las materias primas utilizadas en esta parte experimental son el coque de petróleo (C.P) y la cáscara de cacahuate (C.C). La C.C tiene un tallo rastrero y veloso, su cáscara es coriacea – (relativo al cuero o parecida a él), nuez comestible de tierra y agua se produce en los trópicos, Asia y EE.UU., se usa como alimento y aceite.

El coque de petróleo (C.P.) sólido no destilable es el residuo del crudo con base parafínica, pobre en cenizas en la destilación del petróleo o del cracking. Se obtiene también por calefacción del alquitrán de petróleo, bitumen (nombre de varias sustancias compuestas de carbón e hidrógeno, que se encuentran en la naturaleza y arden con llama, humo espeso y olor peculiar), que se emplea para pinturas (Amador, 1974). En México se producen alrededor de 3,000 ton/d, lo que permite asegurar su aprovisionamiento sin problemas.

El coque se usa como combustible en locomotoras y barcos, fabricación de electrodos de carbón de gran conductividad para escobillas, micrófonos. Al emplear el coque como combustible, debe tenerse en cuenta su elevada conductividad calorífica, que lo coloca en una posición especial frente a todos los demás combustibles.

La composición química del coque utilizado se compara a la reportada por (Dutch, 1983).

Tabla 2.1 Características de coque de petróleo

Características	Porcentaje (%) (Dutch, 1983).	Porcentaje de este estudio.
Sulfuro	6.0 – 7.3	6%
Materia Volátil	6.5 – 7.0	-
Cenizas (600°C)	0.40	13.4%-
Cenizas (700°C)	0.58	-
Sílice	0.008	-
Fierro	0.030 - 0.080	< L.D 0.0915 (ppm)
Vanadio	0.140 – 0.200	5.275 (ppm)
Níquel	0.040 – 0.048	-
Cobre	0.008	-
Humedad	0.8 – 1.0	21.05%
Densidad aparente	0.8 – 0.9	-

*Gabriela Anguiano Cortés*

Tabla 2.1 Continuación

Características	Porcentaje (%)(Dutch, 1983).	Porcentaje de este estudio.
Poder calorífico (BTU/LS)	14000	-
Carbón fijo	91.0 – 92.0	-

L.D. = Límite de detección.

La potencia calorífica inferior del coque puro es de 7,950 Kcal/Kg. El contenido de agua y de cenizas presenta grandes oscilaciones, si bien, en conjunto, no debería ser superior al 12 ó 15%.

### Agentes activantes

Existe gran variedad de activantes que se han reportado (Bansal *et al*, 1988), y cada caso requiere de una selección muy particular para el carbón que se necesite producir.

En este estudio, se utilizaron las siguientes sustancias químicas como agentes activantes.

ZnCl<sub>2</sub> grado industrial, pureza 98%, REASOL.

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> grado industrial, pureza 85%, REASOL.

NaOH grado analítico, pureza 98.7%, J.T. Baker.

### Productos para la caracterización fisicoquímica

En la caracterización de los adsorbentes se emplearon las siguientes sustancias:

Azul de metileno, pureza 99%, REASOL.

Yodo, pureza 99.8%, REASOL.

Tiosulfato de sodio 0.1N, pureza 99.8%,

## 2.1.2. Proceso de adsorción con carbón activado (CA)

### 2.1.2.1. Materiales adsorbentes y adsorbato

Materiales adsorbentes entre los que se encuentran LQ1000, carbón producido a partir de coque +  $ZnCl_2$  (C.P.Z), coque + NaOH (C.P.N), coque +  $H_3PO_4$ (C.P.H).

Se puede decir que el carbón activado a partir de  $ZnCl_2$  y  $H_3PO_4$ , tiene mayor adsorción a ciertas sustancias, es un proceso económico; además de que las cualidades de adsorción, tienen mayor selectividad a impurezas.

Tabla 2.2 Carbón comercial LQ1000.

Características	
Fabricante	CARBOCHEM
País	USA
Origen	Mineral
Activación	Física
Densidad aparente (g/ml)	0.47
Dureza	75
Superficie específica ( $m^2/g$ )	1100
Índice de yodo (mg/g)	1050

Como adsorbato se utilizó el Cloruro de mercurio (II) grado analítico, pureza 99.8%.REASOL

## 2.2.- SISTEMAS EXPERIMENTALES

### 2.2.1. - Procesos de producción de carbón activado

El equipo principal utilizado en el proceso de producción fue un horno prototipo elaborado en el Instituto de Ingeniería (Hernández, 1999), el cual consta de una cámara cilíndrica de cuarzo de 4 cm de diámetro y 50 cm de largo.

Este horno funciona con energía eléctrica (110 v,60Hz). La elevación de la temperatura es controlada mediante un multímetro y un reóstato para obtener una temperatura de 700 a 800°C. El horno utiliza recipientes especiales de grafito, los cuales son llenados con la materia prima activada. Finalmente, para realizar la carbonización éstos fueron colocados en la cámara del horno.

### **2.2.2 Proceso de adsorción de carbón activado**

El proceso se realizó en reactor batch ó matraces de 250mL fabricados en PYREX en los que se colocaron las muestras ó soluciones de  $Hg^{++}$  a tratar.

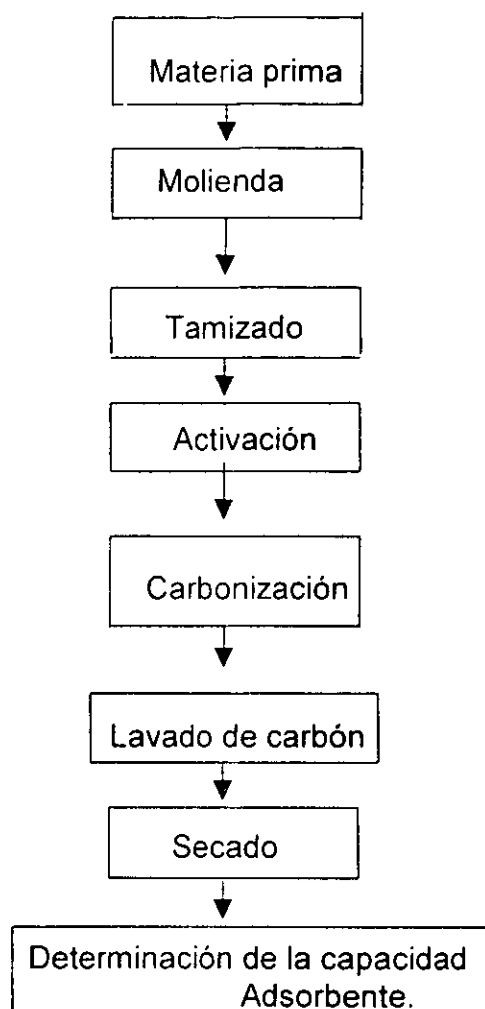
También se utilizó un equipo de agitación magnética. Para la agitación, se colocaron magnetos dentro de los matraces y la velocidad se regula mediante un dispositivo. Estas pruebas se realizaron dentro de un laboratorio, en el que no se registran variaciones de temperaturas de ( $\pm 1$ ).

## **2.3. - TECNICAS EXPERIMENTALES**

### **2.3.1. Proceso de producción con carbón activado**

El proceso de carbón activado implica varias operaciones desde las más importantes como la activación y la carbonización, y otras menores, pero necesarias, como molienda, tamizado, lavado, secado, determinación de la capacidad de adsorbente.

En la figura 2.1 se ilustra de manera resumida, la elaboración de carbón activado.



**Figura 2.1 Diagrama de bloques de elaboración de carbón activado.**

La materia prima se muele y se hace pasar por la malla #16 para el caso de la cáscara de cacahuete y para el coque de petróleo se utiliza sin moler, ni tamizar.

Esto se hace para obtener uniformidad en el tamaño de partícula a carbonizar, en este trabajo se utilizan las partes retenidas en este tamiz.



Una vez definidas las partes a utilizar de acuerdo al tamaño de partícula se efectúa la activación de la materia prima para la cual se utilizó:

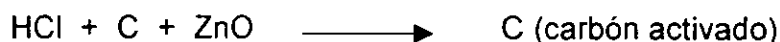
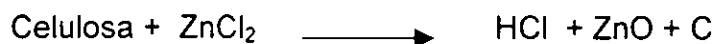
ZnCl<sub>2</sub> diluido 1:1  
H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> diluido 1:1  
NaOH diluido 1:1

### **Activación con ZnCl<sub>2</sub>.**

Para este caso se necesitan 15g de materia prima a los que se adicionan previamente antes mezclados 15g de ZnCl<sub>2</sub> y 15mL de agua destilada. Esta mezcla se lleva a calentamiento en baño de vapor por un tiempo de 3 h, agitando periódicamente a una temperatura de 90°C.

### **Reacciones químicas en el proceso de activación con ZnCl<sub>2</sub>**

La activación con ZnCl<sub>2</sub> presenta un fuerte efecto deshidratante y hace que en el calentamiento se verifique una carbonización completa de las sustancias orgánicas. En la reacción se forma ácido de zinc que se introduce a la red molecular del carbón al llegar a su punto de fusión, por tanto la reacción que se explica el proceso es el siguiente:



### **Activación con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**

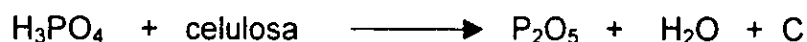
Se pesan 15g de materia prima ya tamizada y mezclar con 15 ml de agua y 15ml de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, calentando en baño de vapor por un tiempo de 3 hrs. Agitando periódicamente a una temperatura de 90°C.

Reacciones químicas en el proceso de activación con H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

El ácido fosfórico ataca a la celulosa produciendo P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, H<sub>2</sub>O y carbón activado.

Actualmente en la industria para la fabricación de carbón no se recupera P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> siendo éste una pérdida económica cuantiosa.

El P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> se puede recuperar para posteriormente tratarlo con agua y volver a obtener el ácido fosfórico, las reacciones que se indican en el proceso de activación y el de regeneración del ácido fosfórico son las siguientes:



### **Activación con NaOH**

Para este caso se necesitan 15g de materia prima a los que se adicionan previamente antes mezclados 15g de NaOH y 15ml de agua destilada, esta mezcla se lleva a calentamiento en baño de vapor por un tiempo de 3 h agitando periódicamente a una temperatura de 90°C.

Después activada la materia prima, se carboniza en el horno. Para que la carbonización sea adecuada se hace pasar un gas (nitrógeno) para producir una

atmósfera inerte dentro del tubo del horno. La materia prima es colocada en los recipientes de grafito y, se coloca dentro de la cámara.

Las temperaturas de activación química varían según el tipo de materia prima y el método empleado.

Las carbonizaciones se realizan utilizando un tiempo de 30 min. , a una temperatura de 700°C para el coque de petróleo con el fin de obtener una carbonización óptima. Para la cáscara de cacahuete se utiliza un tiempo de 30 min, a una temperatura de 400°C para obtener una carbonización adecuada.

Concluida la carbonización se deja enfriar el horno para sacar el contenido. Este es colocado en vasos de precipitado, a los cuales se le adicionan 20 mL de HCl al 10% y se deja en ebullición y agitación constante por un tiempo de 15 min. Finalmente, se filtra a vacío y se lava con agua destilada.

El carbón obtenido es lavado con el propósito de eliminar la mayor cantidad de agentes activantes residuales.

Secado.

El secado se efectúa en una estufa eléctrica a una temperatura de 110 – 135°C durante un tiempo aproximado de 3h. Al final de este tiempo, se retira de la estufa y se coloca en un desecador, evitando que el carbón tenga contacto con el medio ambiente.

Por último, se coloca en recipientes y se guarda perfectamente cerrado hasta que se utilice en las pruebas analíticas de caracterización y adsorción.

### **2.3.2 - Proceso de adsorción**

Los absorbentes producidos y el carbón comercial (LQ1000) fueron aplicados para remover Hg en soluciones sintéticas en un reactor batch, de acuerdo a la técnica "point by point".

Para el proceso de adsorción, el C.A. se muele y se tamiza por la malla #325 hasta que pase un 95%. Se pesan las siguientes dosis de C.A. 0.02g, 0.04g, 0.06g, 0.08g, 0.1g y se colocan en cinco matraces iguales.

A cada matraz se le adiciona 200 mL, de la muestra de agua a tratar en este caso es una solución de HgCl<sub>2</sub> de 500 µg/L.

Se ponen los matraces en agitación magnética y a temperatura ambiente por un tiempo de 6 h. Inmediatamente después de cumplido el tiempo de agitación, se filtra por separado el contenido de cada matraz, a través de filtros Swinnex de 25 mm de diámetro, utilizando papel filtro GF/A circles 24 mm Ø Whatman. Finalmente, se cuantifica el Hg residual en el filtrado.

## **2.4 TECNICAS ANALÍTICAS**

### **2.4.1 Proceso de producción de carbón activado.**

Como en el caso de cualquier producto industrial, las distintas propiedades del C.A se evalúan a través de métodos analíticos que han sido normalizados por diversas asociaciones. La mayoría de los productos los aplican con el objeto de estandarizar y de permitir al usuario la comparación de las especificaciones de diversos carbones. La ASTM de estados unidos es el organismo cuyos procedimientos de

evaluación sigue la mayoría de los fabricantes de C. A. Sin embargo existen otros a los que comúnmente se hace referencia. Entre ellos esta la AWWA, DIN, CEFIC.

Determinación de características de adsorción.

a) Área.

Con el fin de determinar la capacidad de adsorción del carbón activado, se utiliza como adsorbato el azul de metileno que es un colorante catiónico (básico). Este colorante cuando se ioniza en solución acuosa lleva una carga positiva. Por lo tanto, cualquier interacción con grupos ácidos negativos, es atractiva y la cantidad de colorante adsorbida en la primera monocapa, puede considerarse, en ausencia de otros factores, como la medida de superficie total físicamente accesible o de la superficie limitado por el tamaño de poros solamente.

Para determinar la capacidad del adsorbente se utiliza una solución de azul de metileno, la cual es decolorada al contacto con el carbón activado, (La técnica del azul de metileno se presenta en el anexo A)

c) Índice de yodo.

Es el porcentaje de yodo que puede ser adsorbido por una sustancia química no saturada (aceite vegetal, caucho, etc.) en un tiempo de dado, bajo condiciones arbitrarias y constituye una medida de la no saturación. Un método ampliamente usado consiste en hacer reaccionar la sustancia grasa con exceso de monoclóruo de yodo en ácido etanóico. El exceso de reactivo se trasforma, por adición de KI, en yodo libre, el cual se determina por valoración con tiosulfato.

d) Índice de azul de metileno.

El azul de metileno es un colorante cationico que al ionizarse en solución acuosa se carga positivamente; así interactúan con grupos ácidos negativos y la cantidad de

colorante adsorbida en la primera monocapa puede considerarse, en ausencia de otros factores, medida de la superficie total físicamente disponible y limitada únicamente por el tamaño del poro.

Para determinar la capacidad de absorbente se utiliza una solución de azul de metileno, la que se decolora al contacto con el carbón activado a una cierta temperatura (la técnica se presenta en el ANEXO A).

Las técnicas analíticas utilizadas en el análisis del C.A. son las siguientes:

Humedad se describe en la norma ASTM D- 2867.

Dureza se describe en la norma ASTM D-3802.

pH se describe en la norma ASTM D-3838

Índice de yodo se describe en la norma ASTM D- 4607

Azul de metileno se describe en la norma ASTM D-3037 para determinar área superficial.

Cada una de estas técnicas se describe en el ANEXO A.

Por último se realiza un análisis de microscopía electrónica.

Con el fin de caracterizar los carbones activados en la experimentación, se realizó un estudio de los mismos al microscopio. El estudio se realizó en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la facultad de ingeniería de la UNAM. El equipo utilizado fue un microscopio electrónico de barrido, marca PHILIPS XL20, que funciona con un voltaje de aceleración de 15 Kvolts y está equipado con espectroscopía (E. D. S ó Energy Dispersed Spectroscopy). Estas características permiten al equipo realizar un análisis químico cuantitativo de las muestras observadas.

## **2.4.2. Proceso de adsorción**

### **2.4.2.1 Determinación de mercurio**

El mercurio en agua se determinó de acuerdo a la técnica de espectrofotometría de absorción atómica por el método de regeneración de hidruros. La metodología se describe en el ANEXO B.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS



### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el estudio experimental de la producción de carbón activado a partir de materiales económicos y su aplicación para remover mercurio contenido en agua.

Los experimentos se realizaron a nivel laboratorio en régimen discontinuo. La eficiencia de la activación se evaluó con base en una caracterización fisicoquímica de los carbones producidos. La eficiencia de la adsorción de mercurio se determinó en función de los coeficientes de las isothermas de adsorción de Freundlich y Langmuir calculadas para los carbones activados producidos. Los resultados de las caracterización fisicoquímicas y de adsorción se compararon a los valores obtenidos para un carbón activado comercial de origen mineral (LQ1000 de CARBOCHEM).

Finalmente, se presenta un estudio económico de la factibilidad de producir carbón activado. El precio unitario de producción se comparó con respecto a los costos de algunos carbones presentes en el mercado mexicano.

#### **3.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBON ACTIVADO**

##### **3.1.1 Caracterización fisicoquímica de materiales**

En la tabla 3.1 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica del carbón activado comercial (LQ1000), de los diferentes materiales adsorbentes producidos y de las utilizados en este trabajo.

Con base en estos datos se puede determinar que, en todos los casos, la activación de las materias primas seleccionadas (coque de petróleo y cáscara de cacahuate) permite un aumento significativo de las características indicadoras del desarrollo de

la actividad (área específica e índices de azul de metileno y de yodo) de un adsorbente.

El índice de yodo aumenta de tal manera para los carbones producidos que los valores determinados son comparables a los presentados por el carbón comercial LQ1000. En contraste, el área específica y el índice de yodo de estos carbones, particularmente de los producidos a partir de coque de petróleo, son más bajos que el del material comercial de referencia. Esto se explica porque el LQ1000 es activado bajo condiciones más fuertes (proceso físico con vapor 900 °C) que las que se aplicaron a los coques activados (proceso químico a 700°C).

El carbón activado producido a partir de cáscara de cacahuate y cloruro de zinc (CCCZ) es el material que presenta valores de estos tres parámetros comparables a los del LQ1000. Lo anterior se debe a que desde el inicio la cáscara de cacahuate no activada presenta valores altos de estos parámetros y además es un material blando que puede ser activado más fácilmente, por un proceso fisicoquímico, que el coque de petróleo.

Tabla 3.1 Características fisicoquímicas de materiales adsorbentes

CLAVE	Material	pH	Índice de yodo (mg/g)	Índice de azul de metileno (mg/g)	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)	Contenido total de cenizas	% Rendimiento
LQ 1000	Carbón Comercial	6.5	513	252.2	380	11.7	-
CP	Coque petróleo	3.9	4	52.7	0.3	13.4	-
CPCZ	Coque + ZnCl <sub>2</sub>	3.5	73	146.3	16.3	10.9	84.7
CPHS	Coque + NaOH	9.4	42	203	35.4	12.3	83.9
CPAF	Coque + H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	2.7	57	160	31.6	6.6	80.9
CC	Cáscara de cacahuate	-	26	79.6	83.2	-	-
CCCZ	Cáscara de cacahuate+ ZnCl <sub>2</sub>	4.5	233	245	189	-	-

Gabriela Anguiano Cortés

3.1.2 Características superficiales de materiales-Estudio en microscopio electrónico de barrido (Scanning Electrón Microscopy SEM)

Las fotos (3.1a) a (3.1f) presentan detalles de las características superficiales observadas en microscopio electrónico de barrido para el carbón activado comercial (LQ1000) y los diferentes adsorbentes producidos. Es necesario mencionar que las imágenes presentadas se cuentan dentro de una selección que se realizó para ilustrar las principales observaciones hechas en microscopio electrónico.

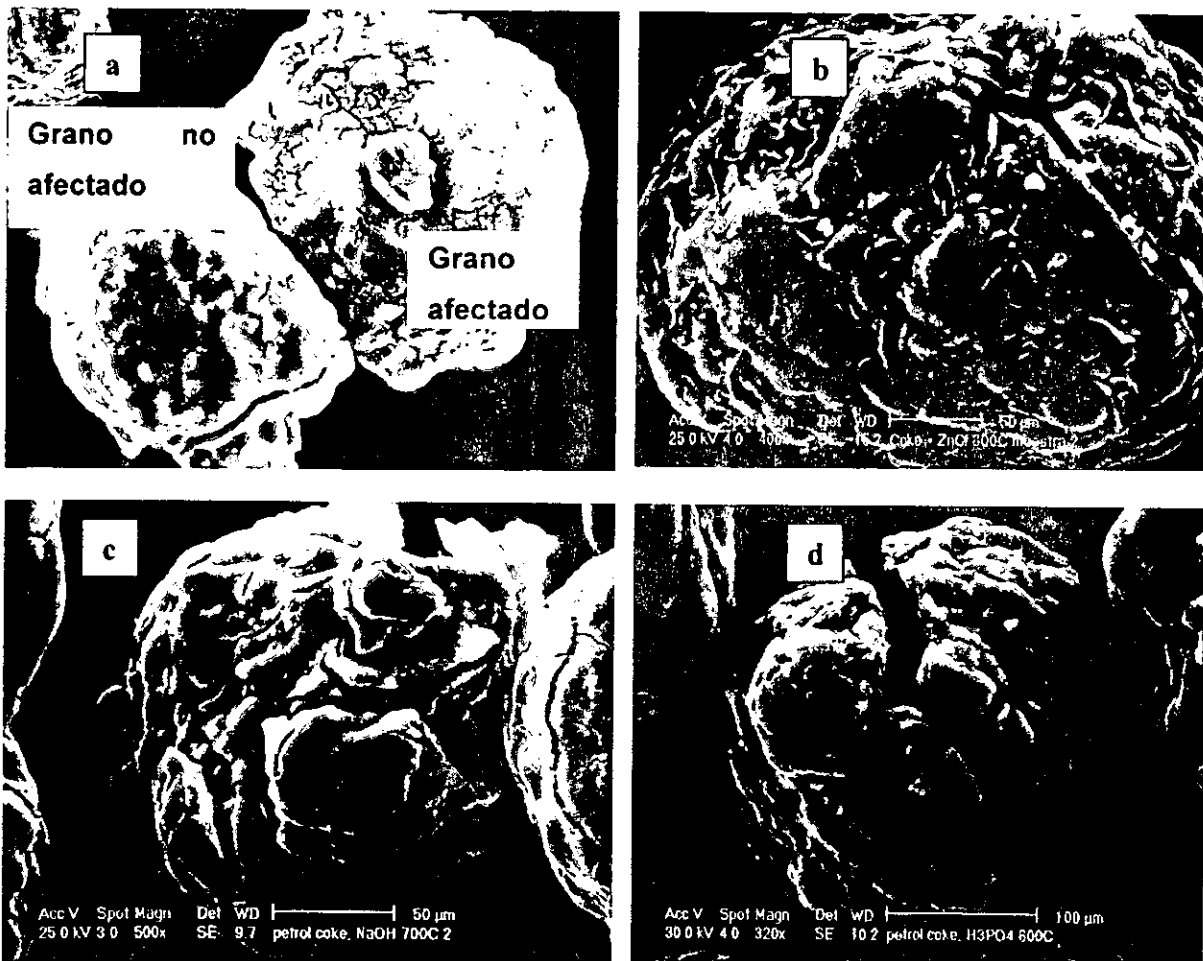
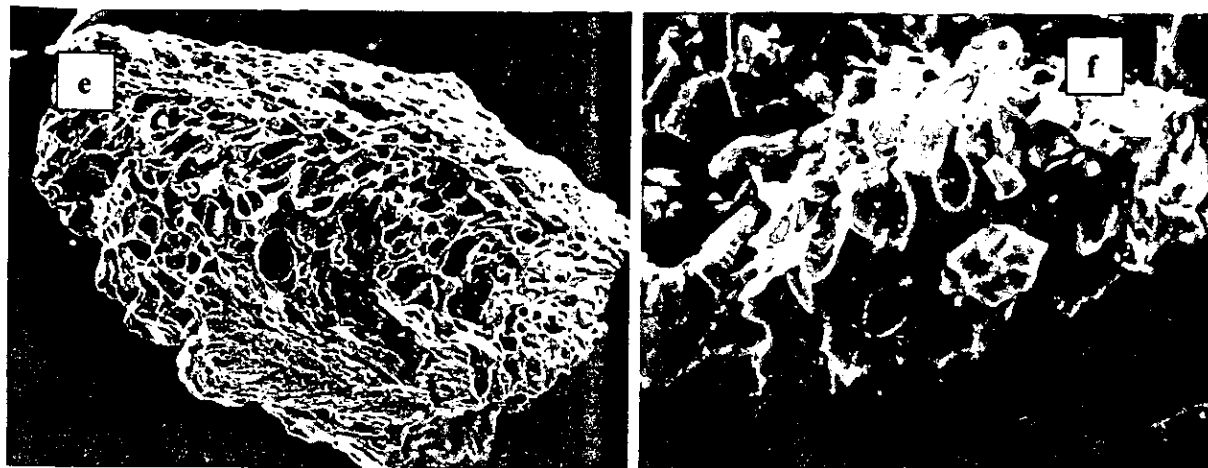


Figura 3.1a) Granos tratados con ácido fosfórico. Efecto de la diferencia de reactividad de las partículas, b) Partícula de coque activado con  $ZnCl_2$ , c) Partícula de coque activado con  $NaOH$ , d) Partícula de coque activado con  $H_3PO_4$ .



**Figura 3. 1e) Partícula de LQ1000 (carbón activado comercial) y f) Partícula de cáscara de cacahuete activada con  $ZnCl_2$ .**

En la primera foto (3.1a) se tiene una representación de granos de coque de petróleo activados con ácido fosfórico. Esta imagen ilustra el importante hecho de que cada grano de coque presenta una reactividad diferente, ya que tiene una partícula no afectada por el proceso de activación y otra que muestra un claro ataque en su superficie. El grano no afectado muestra una serie de manchas negras, blancas y grises repartidas sobre toda la superficie de la partícula. Las de color negra son grietas superficiales que se produjeron como resultado del ataque del agente activante (cloruro de zinc). como se puede apreciar en la foto 3.1b.

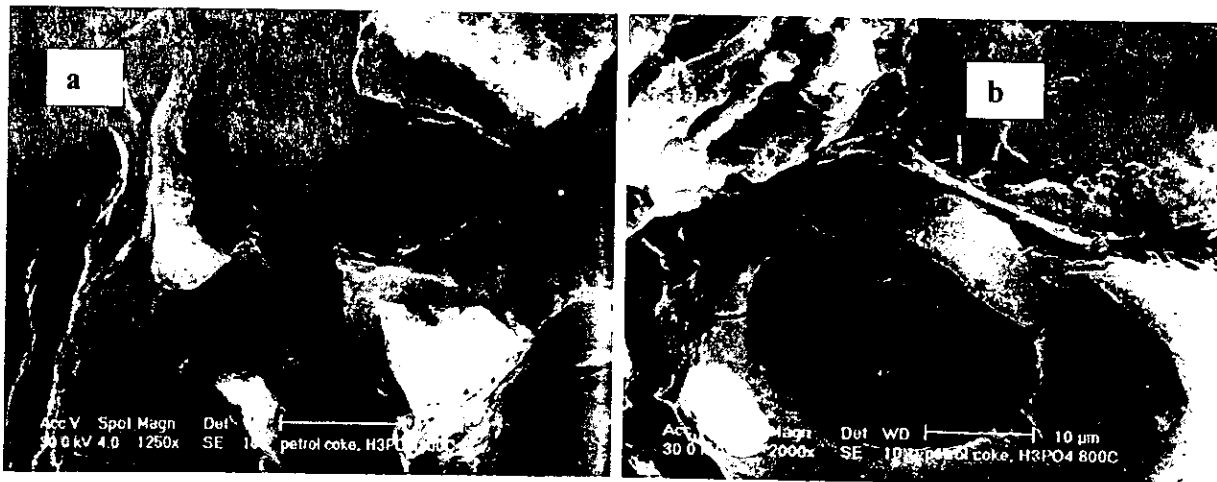
El ataque del ácido fosfórico origina una fisuración más general y profunda de la superficie de la partícula (Foto 3.1c). En esta imagen se aprecia más claramente que el ataque se inicia en las zonas más oscuras, formando como consecuencia un gran número de fisuras. Posteriormente, estas fisuras se extienden más profundamente lo que origina un fenómeno de desprendimiento de las capas concéntricas que forman la partícula de coque. Este efecto se muestra en la foto 3.1d, la cual presentan una partícula activada con ácido fosfórico. Otras partículas activadas con hidróxido de sodio y cloruro de zinc muestran el mismo fenómeno, lo cual permite inferir un mismo mecanismo de ataque en diferente grado. El agente

activante más fuerte es el ácido fosfórico, seguido por el hidróxido de sodio y el cloruro de zinc.

Este mecanismo se puede observar también en la foto del carbón comercial evaluado (foto 3.1e) y la de cáscara de cacahuate activado con cloruro de zinc (foto 3.1f). En las partículas de estos materiales se observa una porosidad significativa.

La foto 3.2b muestra un ejemplo de la formación de mesoporosidad. Esta clase de ataque solamente se observó cuando el agente activante fue el ácido fosfórico. El aspecto más interesante es que el ataque se origina en las zonas más oscuras.

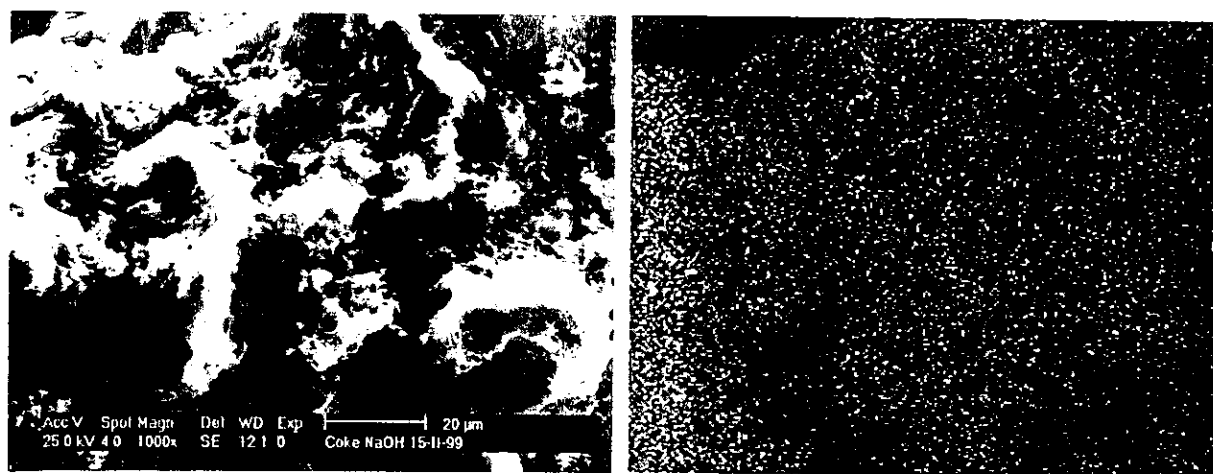
La presencia de estas grietas sobre las partículas del coque activado no es homogénea, se observa principalmente sobre las zonas más oscuras ó de bajo contenido de carbono. Lo anterior permite proponer que el ácido fosfórico ataca primero estas zonas, penetrando posteriormente las capas más profundas de las partículas de coque.



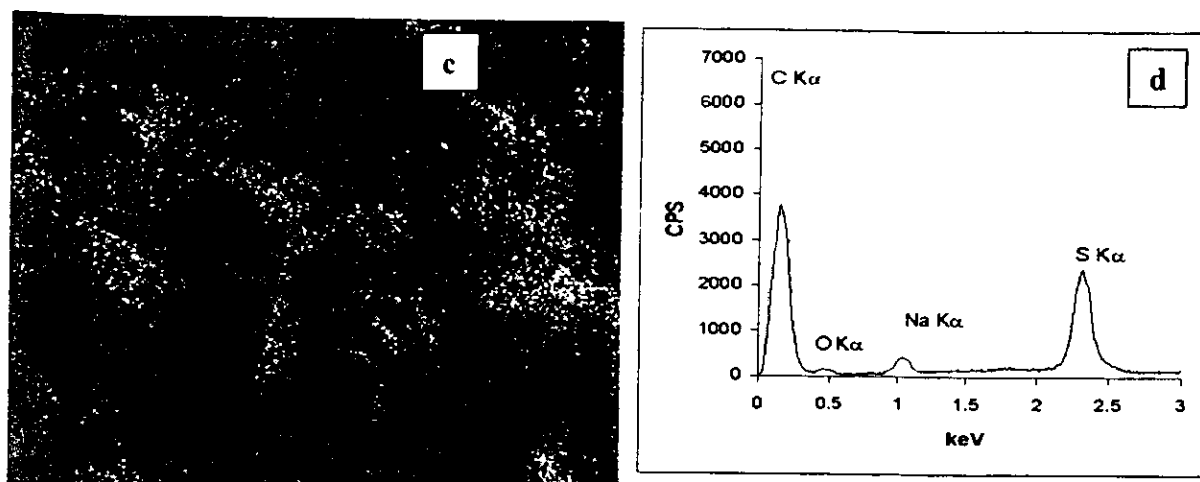
**Figura 3.2a) Coque activado con  $H_3PO_4$ . Efecto de la fisuración y desprendimiento de las capas del coque. b) El ácido fosfórico es el único agente químico de los tres evaluados que permite la formación de mesoporosidad.**

Un aspecto interesante de las observaciones es el hecho que las zonas oscuras del coque son atacadas primero. Una herramienta útil para explicar la formación de contraste observada en el microscopio electrónico, es el concepto de electrones secundarios. Mientras los electrones secundarios son principalmente influenciados por la superficie topográfica, ellos también experimentan la influencia de la densidad del material. La topografía de las regiones oscuras indica que éstas son menos elevadas que las blancas, pero la diferencia es insuficiente para completar la explicación de la diferencia en el contraste.

Como el material contiene principalmente carbono y azufre, una distribución no homogénea de ambos elementos debe ser la responsable por esta diferencia de brillo. Para explicar este efecto, fueron usadas dos técnicas complementarias. La primera consiste en una medición precisa de EDS en dos puntos contiguos del grano de la superficie (en ambas de zonas), eliminando tan bien como fue posible la influencia de la superficie inclinada y los efectos topográficos, los cuales afectan la detección de los rayos-X. El segundo método consiste en una representación completa del área de un grano de coque por escaneo de su superficie para determinar la presencia de S y C. Los resultados se presentan en las figuras (3.3.a) a (3.3.d).



**Figura 3.3a) Un grano de coque activado se presenta en esta imagen electrónica secundaria fue muy afectado por este proceso. Las zonas iluminadas y oscuras se distinguen claramente. b) El mapa del azufre con señal  $K\alpha$  obtenido por EDS, corresponde al grano de la figura 3.3a.**



**Figura 3.3c) El mapa del carbono con señal  $K\alpha$  obtenido por EDS. Las características de la imagen electrónica secundaria son claramente reproducidas. d) El espectro EDS de las zonas brillantes (línea gris) comparado con las zonas oscuras (línea negra).**

La figura 3b muestra la distribución homogénea del azufre sobre la superficie, en las zonas claras y oscuras. La figura 3c muestra que las zonas iluminadas son áreas de alta densidad de carbono, esto puede ser explicado asumiendo una diferencia de configuración química de las moléculas de carbono en ambas zonas. La figura 3d, compara dos espectros diferentes obtenidos usando una corriente modelo constante en zonas, las cuales son topográficamente similares. El eje vertical representa conteos por segundo y el horizontal es eV. No se realizó ningún tratamiento de datos, la coincidencia de los picos de azufre en ambas zonas fue completamente al azar.

Los resultados de ambas técnicas indican la misma tendencia. Los puntos medidos de la composición indican que, mientras los picos del azufre de las zonas claras y oscuras coinciden perfectamente, los picos de carbono difieren significativamente. El mapeo con rayos-X de ambas señales muestran que la imagen del carbono reproduce el contraste del electrón secundario bastante bien, mientras el mapa del azufre solo reproduce las características topográficas más significativas. Esto prueba que las diferencias en el brillo se debe a diferencias en la densidad del componente

de carbono, mientras el azufre se distribuye homogéneamente sobre todo el material.

**3.2 PROCESO DE ADSORCIÓN DE MERCURIO.**

La representación y análisis de los resultados se realizó en base en los valores determinados para las constantes de la isoterma de Freundlich (K, n) y de Langmuir (qm). Los valores calculados a partir de datos experimentales de remoción se presentan en la tabla 3.2 respectivamente.

Se observa que los coeficientes de regresión ( $R^2$ ) se sitúan dentro de un intervalo aceptable, entre 0.81 y 0.98 con un valor promedio de 0.88 para Langmuir en el caso de Freundlich el valor promedio es 0.91. Lo anterior permite concluir que el fenómeno es correctamente descrito por los modelos de las isotermas de Langmuir y de Freundlich.

En el caso de Langmuir, los materiales que presentan los valores más elevados de la capacidad máxima de adsorción de mercurio son el LQ1000, el coque activado con ácido fosfórico y cáscara de cacahuete activada con cloruro de zinc. Estos materiales pueden clasificarse como los más eficientes, del grupo evaluado, para remover este metal pesado del agua.

Tabla 3.2 Constantes de Langmuir y Freundlich de mercurio para diferentes adsorbentes.

	Langmuir 2	Langmuir 2	Freundlich	Freundlich	Freundlich
	qm	$R^2$	K	1/n	$R^2$
LQ1000	10.98	0.98	12.85	0.88	0.98
Coque	4.54	0.83	6.22	0.65	0.86
C + ZnCl <sub>2</sub>	4.44	0.83	8.72	0.84	0.87
C + NaOH	1.43	0.81	-	-	-
C + H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	5.05	0.87	9.60	0.61	0.90
Cacahuete+Z nCl <sub>2</sub>	10.44	0.97	10.80	0.02	0.96

Los valores de K y n, nos permiten analizar el comportamiento de conjunto de estas sustancias con respecto a un carbón activado comercial (LQ 1000). De manera



general, conforme el valor de K aumenta, la capacidad de adsorción del carbón se incrementa para un compuesto dado. La pendiente (1/n) caracteriza la variación de la capacidad de adsorción en función de la concentración al equilibrio. Para un mismo valor de K y a una pendiente mayor, mejor será la capacidad de adsorción de carbón activado para concentraciones residuales de soluto. Considerando estas premisas, se puede concluir, como en el caso del modelo de Langmuir, el LQ1000, que el coque activado con ácido fosfórico y cáscara de cacahuate activada con cloruro de zinc son los mejores adsorbentes, del grupo evaluado, para remover este metal pesado del agua.

Sin embargo, es necesario señalar que el coque de petróleo crudo presenta valores de  $q_m$  y de K importantes, un poco menos de la mitad de los valores calculados para los tres mejores adsorbentes. Lo anterior se puede atribuir al importante contenido de azufre (6%) presente en este material, el cual reacciona con los iones mercúricos lo que contribuye a eliminarlos del medio acuoso (Gómez-Serrano *et al*, 1998).

A continuación se ilustran los resultados obtenidos de concentración residual de mercurio en agua, para diferentes carbones activados en función de la dosis aplicada.

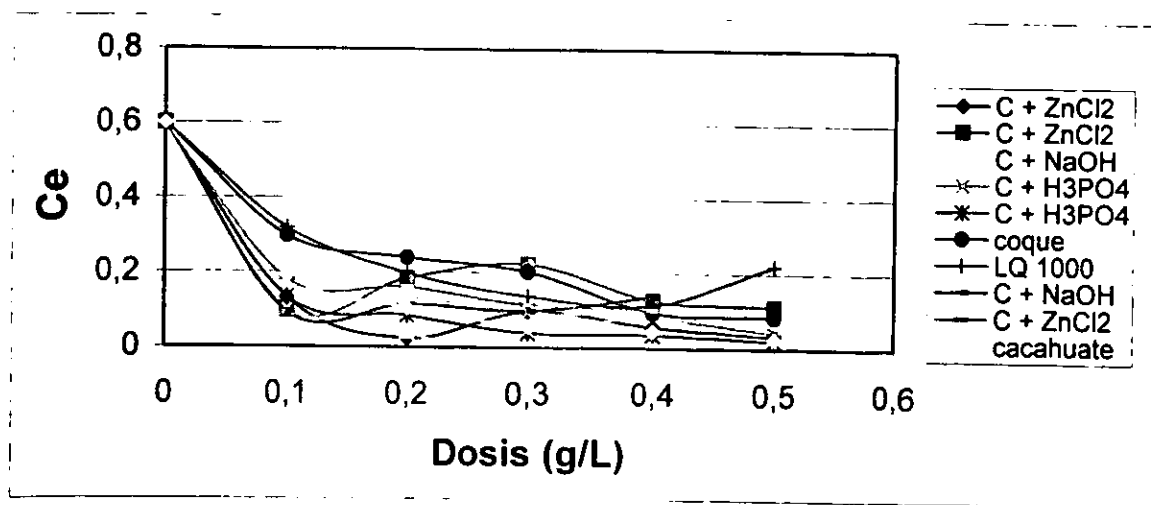


Figura 3.1 Dosis de adsorbente vs Concentración residual de mercurio en agua

En el intervalo de dosis de carbón activado de 0 a 0.2 g/L se observan diferencias importantes en la capacidad de adsorción para los diferentes carbones estudiados. El Coque + H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> resulta ser el más eficiente para remover Hg. En segundo lugar de eficiencia se encuentra los carbones LQ1000, cáscara de cacahuate activada con cloruro de zinc, y el preparado con ZnCl<sub>2</sub> y el carbón menos eficiente es el preparado con NaOH, este presenta a lo largo del intervalo de dosis capacidades de adsorción más bajas. Partiendo de una solución de 500 µg/L, la dosis necesaria para alcanzar la concentración máxima de mercurio admisible (1 µg/L) por la norma de agua potable (**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION"**), es superior a la dosis máxima evaluada en este trabajo .

En conclusión, el coque activado con ácido fosfórico y la cáscara de cacahuate activada con cloruro de zinc presentan características fisicoquímicas y de adsorción de mercurio comparables a las observadas para el carbón activado comercial LQ1000 de origen mineral. Es decir, que los dos carbones activados producidos en este trabajo presentan una factibilidad importante, desde el punto de vista técnico, de aplicarse para la remoción de mercurio contenido en agua. Para evaluar su factibilidad completa, se realizó un estudio económico que se presenta a continuación.

### **3.3 ESTUDIO ECONOMICO**

Evaluación económica para la producción de carbón activado.

En esta parte se presentan los cálculos de los costos totales para una planta productora de carbón activado a partir de cáscara de cacahuate y coque de petróleo. Utilizando como activantes ácido fosfórico, cloruro de Zinc e hidróxido de sodio.

A continuación se presenta el balance de materia para la planta productora de carbón activado.

**RESULTADOS Y DISCUSION**

Tabla 3.3 Balance de materia.

Corrientes	1	2	3	4	5	6
Flujo	1666	1666	1666	1666	1666	1666
Composición	C. C 100%	C. C 100%	C. C 100%	C. C 100%	C. C 100%	Gas 100%
Temperatura	32°C	32°C	32°C	32°C	32°C	32 °C

Corrientes	7	8	9	10	11	12
Flujo	333	750	583	583	583	641
Composición	Gases	residuo	C. T. 100%	C. T. 100%	C. T. 100%	C. T. 100%
Temperatura	400°C	400°C	400°C	40°C	40°C	40°C

Corrientes	13	14	15	16	17	18
Flujo	641	58	58	583	741	741
Composición	C. T. 100%	C. T. 100%	C. T. 100%	C. T. 100%	C. T. 90% C 10%	C. T. 80% C 20%
Temperatura	40°C	40°C	40°C	40°C	32°C	32°C

Corrientes	19	20	21	22	23	24
Flujo	116	675	208	883	883	883
Composición	agua	C.T. 90%	ZnCl <sub>2</sub>	C.T ZnCl <sub>2</sub>	C. A. 90% Max	C. A. 90% Max
Temperatura	40°C	40°C	40°C	40°C	40°C	40°C

Corrientes	25	26	27	28	29	30
Flujo	883	883	971	88	88	883
Composición	C. A. 90% Max	C. A. 90% Max	C. A. 90% Max	C. A. 90% Max	C. A. 90% Max	C. A. 90% Max
Temperatura	40°C	40°C	40°C	40°C	40°C	40°C

**Notas:**

FLUJO: Kg/h.

COMP: EN PESO.

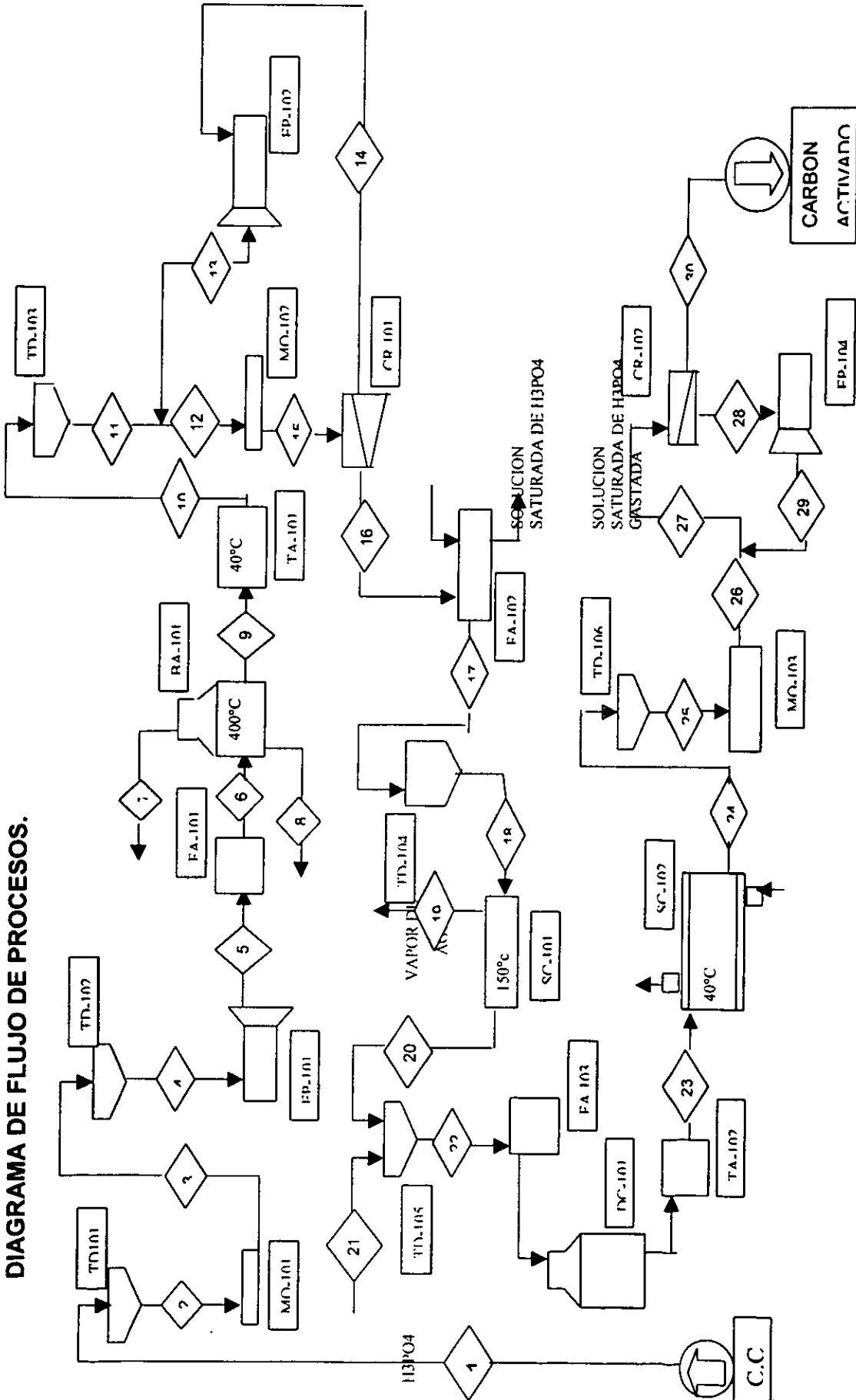
C. T: CARBON TOSTADO.

C. A: CARBON ACTIVADO.

Lista de equipo principal de la planta de carbón activado.

- BA-101 Horno de destilación.
- CR-101 Criba para carbón.
- CR-102 Criba para carbón activado.
- DC-101 Reactor calcinador.
- EC-101 Enfriador de carbón.
- FA- 101 Tanque de destilación.
- FA-102 Tanque de mezclado.
- FA-103 Tanque de reacción.
- MO-101 Molino de cáscara de cacahuete.
- MO-102 Molino de carbón.
- EP-101 Equipo de peletización de materia prima.
- EP-102 Equipo de peletización secundaria.
- EP- 103 Equipo de peletización terciario.
- SC-101 Secador de carbón.
- TD-101 Tolva de recepción de materia prima.
- TD-102 Tolva de la prensa hidráulica.
- TD-103 Tolva del molino de carbón.
- TD-104 Tolva del secador.
- TD-105 Tolva de tanque de calcinación.
- TD-106 Tolva de molino de carbón activado.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS.



AIRE DE ENFRIAMIENTO

Como se ha mencionado anteriormente, el carbón activado tiene innumerables usos dentro de la industria mexicana. A continuación se calcula el consumo nacional aparente de carbón activado a partir de los datos de producción doméstica, importaciones y exportaciones, con el objeto de definir el tamaño de una planta productora acorde a las necesidades del mercado.

Tabla 3.4 Consumo nacional aparente de carbón activado.

<b>Años</b>	<b>Producción Nacional (tons.)</b>	<b>Importaciones (tons.)</b>	<b>Exportaciones (tons.)</b>	<b>Consumo (tons.)</b>
1994	11000	6398	2189	15159
1995	11500	6398	2189	15159
1996	12397	6590	2926	16061
1997	13363	6788	3379	16772
1998	14406	7000	3903	17503
1999	15530	7202	4507	18225

Como puede apreciarse en el cuadro anterior el ritmo al que aumenta el consumo de carbón activado en el país es muy grande, ya que casi duplicó dicha cantidad en diez años, lo cual representa un mercado en amplio crecimiento.

Si bien el país posee una gran capacidad de producción de carbón activado, la falta de diversidad de este obliga a importar considerables cantidades de carbón provenientes de procesos diferentes al utilizado en México.

Aunque se ha determinado en base a tamaño del mercado la capacidad de la planta como de 4000 tons/año. En la práctica ésta iniciará en 3000tons/año y aumentara paulatinamente a su capacidad de diseño en un lapso de cinco años de acuerdo con el cuadro siguiente:

Tabla 3.5 Programa de producción.

<b>Año</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
<b>Producción (tons.)</b>	3000	3000	3500	3500	4000	4000	4000	4000	4000	4000
<b>Capacidad aprovechada</b>	75%	75%	88%	88%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Este aplazamiento de la utilidad de la capacidad en su totalidad se debe a factores tales como la penetración en el mercado del producto y la capacidad, y experiencia que adquieran el personal a cargo de la comercialización.

Con el fin de anticipar los resultados económicos que produciría el proyecto, se ha calculado el costo de producción que estaría vigente durante los primeros cinco años de operación. En este cálculo se ha considerado una tasa promedio de inflación de 9.81% anual.

Los costos de producción se pueden clasificar como directos e indirectos, siendo los primeros los costos que intervienen directamente en la producción como lo son el costo de la materia prima, la mano de obra del personal que labora directamente en la transformación de los materiales o bien electricidad o combustible necesarios para el funcionamiento del equipo. Los costos indirectos son aquellos como los salarios del personal que no interviene en forma directa en la producción, que si bien son desembolsos directamente ligados a la producción, no interviene en forma directa en ella.

En esta primera parte se determinara el monto de los recursos económicos necesarios para realizar el proyecto y el costo de operación de la planta  
Estimación de la inversión fija total.

Tabla 3.6a Activos fijos

Equipo de proceso	\$4878000.00
Equipo auxiliar	\$3902400.00
Equipo y vehículos de transporte	\$2926800.00
Equipo para prevenir la contaminación ambiental	\$1951200.00
Mobiliario y equipo auxiliar	\$1951200.00
Instalación de equipos	\$4146300.00
Terreno y acondicionamiento	\$4390200.00
Edificios	\$11210400.00
Subtotal	\$35356500.00

Tabla 3.6b Activos diferidos

Planeación e interpretación del proyecto	\$1219500.00
Ingeniería de proyectos	\$3902400.00
Supervisión de la construcción	\$2439000.00
Administración del proyecto	\$975600.00
Fletes y seguros	\$731700.00
Subtotal	\$9268200.00
Total	\$44622700.00



**Costos directos**

Materia prima: El material básico que se utilizará en este proceso es la cáscara de cacahuete y coque de petróleo, el cual no tiene precio, ya que es un material de desecho. Para producir una tonelada de carbón activado se requieren dos toneladas de cada una de las materias primas para obtener una de producto.

Otros materiales que se utilizan en el proceso son:

Cloruro de Zinc, el cual tiene un valor de \$ 19600.00/Ton. De éste se utiliza 0.3 tons. por cada tonelada de carbón activado producido por lo que el precio unitario de este material es de \$ 5880/Ton. de carbón activado.

Para el caso de los otros dos activantes se sigue el mismo procedimiento anterior teniendo un precio unitario para NaOH de \$3465.00/Ton. de carbón activado, y el H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> que tiene un precio unitario de \$ 9765.00/Ton. de carbón. Activado.

Electricidad: el costo de la electricidad anual de los equipos para el proyecto se calculo como un 70% anual del valor de los equipos lo que da para el primer año \$6146280.00

Combustible: El combustible que se utilizara en la planta será diesel, el cual tiene un precio de 2.25/lt. El consumo de este combustible por tonelada de carbón activado es de 1020lt. con un precio de \$2295.00.

Agua se requiere aproximadamente 25 m<sup>3</sup> de agua diariamente para servicios generales dado que el proceso consume solamente 1m<sup>3</sup>/día. El precio de agua cruda es de. \$ 3.25m<sup>3</sup>. Anualmente se consumirán 7500 m<sup>3</sup> con un costo de \$24375.00.

**Costos de mano de obra directa e indirecta se presenta en el siguiente cuadro.**

**Tabla 3.7a Costos de la mano de obra directa**

Mano de obra directa	No de plazas por día		Sueldo Mensual por día	sueldo total anual	
	1 Turno	2 Turno		1 Turno	2 Turno
Jefe de turno	1	2	\$8000.00	\$124800.00	\$249600.00
Obreros	15	30	\$3000.00	\$702000.00	\$1404000.00
Ayudante general	3	6	\$2000.00	\$93600.00	\$187200.00
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>38</b>		<b>\$920400.00</b>	<b>\$1840800.00</b>

Incluye un 30% de prestaciones en el sueldo total anual

**Tabla 3.7b Costos de la mano de obra indirecta**

	No de plazas por día		Sueldo Mensual por día	sueldo total anual	
	1 Turno	2 Turnos		1 Turno	2 Turnos
Jefe de Lab. C.A	1	2	\$8000.00	\$124800.00	\$249600.00
Técnico de Lab. C. A.	5	10	\$5000.00	\$390000.00	\$780000.00
Jefe de almacén	1	2	\$6000.00	\$93600.00	\$187200.00
Almacenista	3	6	\$3000.00	\$140400.00	\$280000.00
Mecánico de mantenimiento	5	10	\$4000.00	\$312000.00	\$624000.00
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>30</b>		<b>\$1060800.00</b>	<b>\$2121600.00</b>

Incluye un 30% de prestaciones en el sueldo total anual

### **Costos indirectos**

Depreciación y amortización. En el siguiente cuadro se indican cuales serán los cargos por depreciación de los activos tangibles y la amortización de los activos intangibles, así como su valor de rescate.

Tabla 3.8 Depreciación y amortización de la inversión fija y diferida.

Activos fijos	Inversión inicial	Tasa de depreciación anual	2001	2002	2003	2004	2005
Equipo de proceso	\$4878000.00	10%	\$487800.00	\$487800.00	\$487800.00	\$487800.00	\$487800.00
Equipo auxiliar	\$3902400.00	10%	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00
Equipo y vehículos de transporte	\$2439000.00	25%	\$731700.00	\$731700.00	\$731700.00	\$731700.00	0
Equipo para prevenir la contaminación ambiental	\$1951200.00	10%	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00
Mobiliario y equipo auxiliar	\$1951200.00	10%	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00
Instalación de equipos	\$4146300.00	10%	\$414630.00	\$414630.00	\$414630.00	\$414630.00	\$414630.00
Terreno y acondicionamiento	\$4390200.00	0%	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Edificios y obra civil	\$14634000.00	5%	\$731700.00	\$731700.00	\$731700.00	\$731700.00	\$731700.00
Subtotal	\$38780900.00						

Activos diferidos.

Activos diferidos	Inversión inicial	Tasa de amortización anual	2001	2002	2003	2004	2005
Planeación e interpretación del proyecto	\$1219500.00	10%	\$121950.00	\$121950.00	\$121950.00	\$121950.00	\$121950.00
Ingeniería de proyectos	\$3902400.00	10%	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00
Supervisión de la construcción	\$2439000.00	10%	\$243900.00	\$243900.00	\$243900.00	\$243900.00	\$243900.00
Administración del proyecto	\$975600.00	10%	\$97560.00	\$97560.00	\$97560.00	\$97560.00	\$97560.00
Fletes y seguros	\$731700.00	10%	\$73170.00	\$73170.00	\$73170.00	\$73170.00	\$73170.00
Subtotal	\$9268200.00	10%					
<b>TOTAL</b>	<b>\$48049109.00</b>		<b>4731660.00</b>	<b>4731660.00</b>	<b>4731600.00</b>	<b>4731660</b>	<b>3999960.00</b>

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Depreciación y amortización de la inversión fija y diferida.

Activos fijos	Tasa de depreciación anual	2006	2007	2008	2009	2010	Valor de rescate
Equipo de proceso	10%	\$487800.00	\$487800.00	\$487800.00	\$487800.00	\$487800.00	\$0
Equipo auxiliar	10%	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$0
Equipo y vehiculos de transporte	25%	0	0	0	0	0	\$0
Equipo para prevenir la contaminación ambiental	10%	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$0
Mobiliario y equipo auxiliar	10%	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$195120.00	\$0
Instalación de equipos	10%	\$414630.00	\$414630.00	\$414630.00	\$414630.00	\$414630.00	\$0
Terreno y acondicionamiento	0%	0	0	0	0	0	\$4390200.00
Edificios y obra civil	5%	\$731700.00	\$731700.00	\$731700.00	\$731700.00	\$731700.00	\$7317000.00

Activos diferidos

Activos diferidos	Tasa de amortización anual	2006	2007	2008	2009	2010	Valor de rescate
Planeación e interpretación del proyecto	10%	\$121950.00	\$121950.00	\$121950.00	\$121950.00	\$121950.00	\$0
Ingeniería de proyectos	10%	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$390240.00	\$0
Supervisión de la construcción	10%	\$243900.00	\$243900.00	\$243900.00	\$243900.00	\$243900.00	\$0
Administración del proyecto	10%	\$97560.00	\$97560.00	\$97560.00	\$97560.00	\$97560.00	\$0
Fletes y seguros	10%	\$73170.00	\$73170.00	\$73170.00	\$73170.00	\$73170.00	\$0
<b>TOTAL</b>		<b>\$3999960.00</b>	<b>3999960.00</b>	<b>3999960.00</b>	<b>3999960.00</b>	<b>3999960.00</b>	<b>\$11707200.00</b>

Donde Valor de rescate = Valor de adquisición -  $\Sigma$  Depreciación acum..

### Mantenimiento

El mantenimiento preventivo del equipo se calcula con base en datos de consumo aproximados de refacciones que mencionan los principales proveedores de maquinaria y equipo. Dicho costo significa aproximadamente el 2% del costo de los equipos.

*Gabriela Anguiano Cortés*

Seguros.

Se han calculado como el 1% de la inversión fija total.

### Costos de producción

Los datos de las secciones anteriores se integran en el cuadro siguiente para determinar el costo de la producción anual y unitario, de carbón activado a partir de cáscara de cacahuete (se presenta un ejemplo del costo de producción de carbón activado a partir de cáscara de cacahuete y  $ZnCl_2$ , para los demás carbones se muestran en el Anexo D).

Tabla 3.9 Costos de producción de carbón activado a partir de cáscara de cacahuete y  $ZnCl_2$

Año	2001	2002	2003	2004	2005
Carbón Activado producido (Ton.)	3000	3000	3500	3500	4000

### Costos directos.

Cáscara de cacahuete	-	-	-	-	-
Cloruro de Zinc.	\$17640000.00	\$18874800.00	\$23404752.00	\$25043084.00	\$30051700.00
Energía eléctrica	\$6146280.00	\$6576519.00	\$7036875.00	\$7529456.00	\$9035347.00
Combustible	\$6885000.00	\$7366950.00	\$7882636.00	\$8434420.00	\$10121304.00
Agua	\$24375.00	\$26081.00	\$32340.00	\$34604.00	\$41524.00
Mat. De consumo y refacciones.	\$11104	\$11881.00	\$14768.00	\$15802.00	\$18926.00
Mano de obra directa.	\$1840800.00	\$1969656.00	\$5448282.00	\$5829662.00	\$6237738.00
Subtotal	\$34547559.00	\$34825887.00	\$43819653.00	\$46887007	\$55465016.00

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN****Costos indirectos.**

Depreciación y amortización	\$4731660.00	\$5015559.00	\$5366648.00	\$5742313.00	\$6144275
Mantenimiento	\$135413.00	\$144891.00	\$155033.00	\$165885.00	\$177497.00
Seguros de la planta	\$666910.00	\$713593.00	\$763544.00	\$816992.00	\$874181.00
Mano de obra indirecta	\$2121600.00	\$2270112.00	\$2429020.00	\$2599051.00	\$2780985.00
Subtotal	\$7645583.00	\$8144155.00	\$8714245.00	\$9324241.00	\$9976938.00
Costos totales de producción	\$42193142.00	\$42970042.00	\$52533898.00	\$56211248.00	\$65441954.00
Costos unitarios de (\$/Ton.)	\$14064.00	\$14323.00	\$15009.00	\$16060.00	\$16360.00

**Costos de producción (continuación).**

<b>Año</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
Carbón Activado producido (Ton.)	4000	4000	4000	4000	4000

**Costos directos.**

Cáscara de cacahuate	-	-	-	-	-
Cloruro de Zinc.	\$32155319.00	\$34406191.00	\$36814624.00	\$39391648.00	\$42149063.00
Energía eléctrica	\$9667821.00	\$10344568.00	\$11068688.00	\$11843496.00	\$12672541.00
Combustible	\$10829795.00	\$11587881.00	\$12399033.00	\$13266965.00	\$14195652.00
Agua	\$44431.00	\$47541.00	\$50869.00	\$54430.00	\$58240.00
Mat. de consumo y refacciones.	\$20289.00	\$21709.00	\$23229.00	\$24855.00	\$26595.00
Mano de obra directa.	\$6674380.00	\$7141587.00	\$7641498.00	\$8176403.00	\$8748751.00
Subtotal	\$59392035.00	\$63549477.00	\$67997941.00	\$72757797.00	\$77850542.00

**Costos indirectos.**

Depreciación y amortización	\$6574374.00	\$7034580.00	\$7527000.00	\$8053890.00	\$8617662.00
Mantenimiento	\$189922.00	\$203217.00	\$217442.00	\$232663.00	\$248949.00
Seguros de la planta	\$935374.00	\$1000850.00	\$1070909.00	\$1145873.00	\$1226084.00
Mano de obra indirecta	\$2975654.00	\$3183950.00	\$3406826.00	\$3645304.00	\$3900475.00
Subtotal	\$10675324.00	\$11422597.00	\$12222177.00	\$13077730.00	\$13993170.00
Costos totales de producción	\$70067359.00	\$74972074.00	\$80220118.00	\$85835527.00	\$91843712.00
Costos unitarios de (\$/Ton.)	\$17517.00	\$18743.00	\$20055.00	\$21459.00	\$22961.00

A continuación se presentan los precios promedios de los carbones activados producidos en comparación con un carbón comercial.

Tabla 3.10 Costos unitarios de (\$/kg) los carbones activados.

<b>Carbón activado</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>
1) C.C. + ZnCl <sub>2</sub>	\$14.064	\$14.323	\$15.009	\$16.060	\$16.360
2) C.P + ZnCl <sub>2</sub>	\$14.064	\$14.323	\$15.009	\$16.060	\$16.360
3) C.P + H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	\$17.286	\$18.480	\$20.026	\$20.817	\$21.365
4) C.P + NaOH	\$10.983	\$11.739	\$12.273	\$13.132	\$13.296
5) LQ1000	\$21.16	\$22.76	\$24.16	\$25.76	\$26.26

En la tabla anterior se observa que los carbones producidos son competitivos con respecto al carbón comercial (LQ1000), ya que el costo unitario se encuentran por debajo del costo del carbón LQ1000 (\$ 21.16).

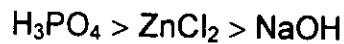
# CONCLUSIONES



## CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la factibilidad de producir carbones activados, por métodos químicos, a partir de desechos industriales (cáscara de cacahuete y coque de petróleo) y, su aplicación para remover mercurio contenido en agua.

Para la activación de estos materiales se evaluaron tres sustancias como agentes activantes: cloruro de zinc, ácido fosfórico e hidróxido de sodio. La efectividad para la activación de estos compuestos, medida en términos de desarrollo de propiedades fisicoquímicas (área específica e índice de yodo y de azul de metileno) se clasifican en el siguiente orden:



En general el modelo de Freundlich y el de Langmuir representan correctamente los equilibrios de adsorción de los carbones, ya que, se obtiene coeficientes de correlación bastante aceptables. Estos modelos en combinación con otras pruebas complementarias pueden permitir el dimensionamiento de unidades de adsorción destinada al tratamiento.

En conclusión, al término de este estudio, se encontró que una vez procesadas las materias primas, se obtiene absorbentes con buenas características fisicoquímicas y de adsorción de mercurio. Los parámetros fisicoquímicos del coque activado con ácido fosfórico y de la cáscara de cacahuete activada con cloruro de zinc son comparables a los valores obtenidos para un carbón activado comercial de origen mineral(LQ1000).

# BIBLIOGRAFÍA

**BIBLIOGRAFIA**

1. Adams, M.D.(1991). The mechanisms of adsorption of  $\text{Hg}(\text{CN})_2$  and  $\text{HgCl}_2$  on to activated carbon. *Hydrometallurgy*, **26**: 201-210.
2. Anglo, A. I. (1992). Ingeniería Medioambiental aplicada a la industria y a la empresa. Ecología Industrial. Ediciones Mundi-prensa S.A. España.
3. B. Desai (1981). Preliminary cost of process plants. *Chem. Eng.*, julio 27.
4. Baca U. (1995). Evaluación de proyectos. Ed. Mc Graw-Hill. México, D.F.
5. Biester H, Schuhmacher P and Muller G. (1999) Effectiveness of mossy tin filters to remove mercury from aqueous solution by  $\text{Hg}(\text{II})$  reduction and  $\text{Hg}(0)$  amalgamation. Institute of environmental Geochemistry. INF 236, Germany.
6. Biester H. and Scholz Ch.(1997) Determination of mercury binding forms in contaminated soils. Mercury pyrolysis v sequential extraction. *Environ. Sci. Tech.* **31**: 2333-2339.
7. Catala, R.M., Ibañez, R. E. (1983) Contaminación por metales pesados. *Revista Agroquímica y Tecnología*.
8. Carrillo, A.A. (1976). Carbones activados a partir de lirio acuático. Tesis facultad de química. U.N.A.M. México, D.F.
9. Cetina, R., Chao, O.; Cuervo, L. (1973) Carbones vegetales activados obtenidos de la cachaza. *Rev. Soc. Química*. México. **17**(6).
10. Chand R. B., Baptiste D. J., Stoeckli. F. (1988). Active carbón. Editorial Marcel Dekker, Inc. New York.

11. Cheremisinoff Paul, Ellerbusch, F.(1985) Carbon adsorption handbook. Publishers INC/ Butterworth group.
12. Chiarle, S. Ratto, M. and Rovatti, M. (1999). Mercury removal from water by ion exchange resins adsorption. *Wat. Res.* **34**
13. Conde, A. J. (1995). Estudio Técnico económico para una planta de carbón activado. Tesis, Facultad de química. U.N.A.M. México, D.F.
14. Dutch, R.; Shell Group of companies(1983). The petroleum. Handbook. Sixth edition. Elsevier.
15. Grasso, C. G. (1997). El carbón activado granular en el tratamiento del agua. Aconcagua ediciones y publicaciones. Madrid.
16. Gomez, S. V, Macias, G. A and Espinosa, M. A (1997). Adsorption of mercury, cadmium and lead from aqueous solution on heat-treated and sulphurized activated carbon. *Wat. Res.* **32**
17. Gutiérrez, B. J. (1977). Elaboración de carbón activado a partir de cascara de coco y otras nueces. Tesis. Facultad de Química. U.N.A.M. México, D.F.
18. Hassler, J.W. (1951). Activated carbon. Brooklin, Chem. Publishing corp.
19. Jodko,C. and Szopinski. (1972). Mercury dichloride adsorption on activate carbon. *Przem. Chem.*, Series 51.
20. Kirk, R.E.; Alhemer, D.F. (1961) Enciclopedia de la tecnología química. UTHEA, Méx. Vol. I, II.
21. Langmuir, J. J. *Am. Chem Soc.*, 38,2221 (1916). 40, 1361 (1918).
22. López-Gonzalez, J.D.; Moreno-Castilla, C., Guerrero-Ruiz, A. and Rodriguez-Reinoso(1982). *F. J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **32**: 575-579.

23. Ritter, J. and Bibler, P. (1992). Removal of mercury from waste water: large-scale performance of an ion exchange process. *Wat Sci. Tech.* 25.
24. Smith, J.M. (1977). Ingeniería de la cinética química. Editorial continental S.A, México.
25. Sosa Hurtado, Carlos Fabian. (1981). Estudio técnico económico preliminar para la obtención de carbón activado. Tesis. Facultad de química. UNAM.
26. Thuesen, H. G (1986) Ingeniería económica. Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
27. Weber, W.J. (1979) Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos. Editorial Reverte Tr. Jorge Bessa Barcelona.
28. Weber, W.J. Jr. Borchardt, J. A; Canales, R.I.; Cleasby, J.L.; Cruver, J.E.; Dick, R.P.; Donahue, F.M.; O'Melia, C.R.; Rosselt, H.S.( 1972) Physicochemical Processes Forwater Quality Control. Wiley interscience publication, John Wiley an Sons.
29. Winnac, K.K.; Weinga, E.E. (1958) Tecnología Química. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona.
30. Wehman, V. W.(1972) Removal of inorganic Mercury (II) from aqueous solution by chelate complexation and active carbón adsorption the university of texas, Austin, texas.
31. Youssel, A.M., El – Wakil, E.A., El- Sharkawy, A: B., Farag and K tollan.(1995). Adsorption of heavy metals on coal-based activated carbons. Science, Chemistry. Suez canal University Egypt.

**ANEXOS**

## **ANEXO A**

### **Descripción de los métodos de análisis de calidad del carbón activado**

El método experimental para obtener isotermas se describe en la norma ASTM D3860 y de manera resumida consiste en lo siguiente:

#### **Aparatos y material.**

- Matraces Erlenmeyer de 250ml.
- Papel filtro de GF/A circle de 24 mm Ø.
- Filtros de membrana.
- Balanza analítica
- Parrilla de agitación magnética
- Agitadores magnéticos
- Envases de plástico de 100ml.

Se muele una muestra del CA hasta que el 95% de ella pase por la malla No 325. Esto tiene por objeto disminuir el tiempo necesario para alcanzar la saturación o el equilibrio. La muestra se saca hasta peso constante. Normalmente es suficiente 3h a 150°C.

Se colocan diferentes cantidades de carbón en cinco o seis matraces iguales. A estas cantidades se les denomina  $M(g)$ . A cada matraz se le agrega un volumen,  $V_m(l)$  de la muestra del agua a tratar. Las cantidades de carbón deben ser tales que logre la remoción de entre 10 y 85 por ciento del o de los adsorbatos. A uno de los matraces no se le agrega el carbón.

Los matraces deben estar a una temperatura constante es decir a 20°C. Los matraces se ponen en agitación mecánica o con un agitador magnético. En muchos casos dos horas son suficientes para alcanzar el equilibrio, aunque debe verificarse esto como un estudio de tiempos de contacto.

Después de cumplido el tiempo de agitación, se filtran por separado el contenido de cada matraz, a través de filtros de membranas, de 0.4 a 0.45 micrómetros.

Las muestras filtradas se analizan y se obtiene los resultados

## ANÁLISIS QUÍMICOS

### Humedad (basado en ASTM D-2867)

#### Aparatos y materiales

- Estufa eléctrica, que puede mantenerse entre 145 y 155°C.
- Desecador.
- Balanza analítica con sensibilidad de 0.1mg

#### Procedimiento.

Se colocan de 5 a 10 g de muestra de CA en la cápsula previamente secada y tarada. Se tapan -la tapa también debe de estar seca y tarada- y se pesan de inmediato con precisión de 0.5 mg. Se remueve la tapa y se colocan la cápsula y la tapa en el horno precalentado a 145-155°C. se cierra el horno y se seca hasta peso constante.



Normalmente 3 horas son suficientes. Posteriormente se saca la cápsula y se deja enfriar en el desecador y se pesa.

#### Cálculos

$$\text{Humedad en porcentaje en peso} = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

NOTA: en caso de que el CA se incendie espontáneamente a una temperatura inferior a la que se somete en esta prueba, o que contenga compuestos orgánicos miscibles en lugar o en adición al agua se utiliza otro método para determinar la humedad.

Este último es el de extracción con xileno, y se incluye en los métodos D-2867 de la ASTM.

#### Contenido de cenizas totales (basado en ASTM D- 2866)

#### Aparatos y material

- Mufla, que pueda mantenerse a 650 ± 25°C
- Crisol para alta temperatura
- Balanza analítica con sensibilidad para 0.1 mg
- Desecador
- Estufa eléctrica, que pueda mantenerse entre 145 y 155°C

#### Procedimiento

Se coloca el crisol en la mufla a 650 ± 25°C durante una hora. Se coloca el crisol en el Desecador. Se deja a que enfrie a temperatura ambiente y se pesa con precisión

*Gabriela Anguiano Cortés*

de 0.1mg. Se seca una muestra de CA hasta peso constante a 145-155°C normalmente 3 horas son suficientes.

Se pesa una cantidad de la muestra seca tal que la cantidad estimada de cenizas sea de 0.1g se coloca en el crisol en el Desecador se deja que enfríe y se pesa con precisión de 0.1mg.

$$\text{Contenido de cenizas totales} = \frac{\text{Pérdida de peso en la incineración}}{\text{Peso de la muestra seca}} \times 100$$

pH (basado en ASTM D- 3838)

Aparatos y material.

- Balanza con precisión de 0.01g
- Parrilla eléctrica
- Termómetro con escala de 0 a 120°C
- Potenciómetro
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml
- Cronómetro
- Papel filtro
- Embudo para el papel filtro
- Agua destilada
- Matraz para filtración a vacío
- Buchner

Procedimiento

Se determina la humedad del CA con el método ASTM D-2867; se toma una muestra de carbón que corresponda a 10 +/- 0.01g en base seca, y se coloca en el matraz erlenmeyer.

Se pone a hervir por separado 110 ml de agua reactivo, y se añaden 100ml de la misma al matraz erlenmeyer cuando aún se encuentra caliente, Se lleva el agua lentamente a ebullición ( para evitar salpicaduras de carbón; una vez en ese punto, se deja hervir durante 900 seg. , es decir 15 minutos).

Inmediatamente se filtra a vacío el contenido del matraz a través del papel filtro previamente humedecido con agua destilada. Se recibe el filtrado en el matraz para vacío se deja que enfríe hasta 45-55°C y se mide el pH.

**Indice de yodo** (basado en ASTM D-4607).

#### Aparatos y material

- Balanza analítica
- Bureta de 50 ml
- Matraces Erlenmeyer 250 ml
- Papel filtro whatman de 55mm Ø GF/A
- Parrilla
- Probeta graduada de 50 y 100 ml
- Solución estandarizada de tiosulfato de sodio 0.10N
- Solución estandarizada de yodo 0.10N
- Solución de almidón
- Solución de ácido clorhídrico al 5%.

#### Procedimiento

Se pulveriza el carbón activado se pasa a través de la malla No 325. Se pesan cuatro dosis de carbón y se transfieren a matraces erlenmeyer. Se agregan con

pipeta 10.0 ml de la solución de ácido clorhídrico 5% a cada uno de dichos matraces, se tapan y se agitan hasta que todo el carbón se haya humedecido.

Se destapan y se colocan en la parrilla, hasta que inicie la ebullición. Se deja ebullición durante  $30 \pm 2$  s para eliminar el sulfuro que podría interferir con los resultados.

Se retiran los matraces de la parrilla y se dejan enfriar, se agregan con pipeta 100.0 ml de la solución de yodo a cada matraz ( solución de yodo estandarizada 0.1N), e inmediatamente se tapan y se agitan durante  $30 \pm 2$  s.

Se filtran a vacío el contenido de cada matraz, de cada filtrado se descartan los primeros 20 o 30 ml, y se recibe el resto del filtrado en matraces limpios. Se agita el contenido y se transfieren 50 ml con pipeta a matraces erlenmeyer.

Se titula cada filtrado con la solución de tiosulfato de sodio 0.1N estandarizada, hasta que la solución se torna amarilla muy pálido. Se agrega aproximadamente 2 ml de la solución de almidón y se continúa la titulación hasta que vire a transparente. Se registra el volumen de la solución de tiosulfato utilizada

#### Cálculos

Para cada muestra de carbón se calcula el yodo adsorbido por el carbón  $X/M$  (mg/g) y la concentración del filtrado residual.  $C$  (N) con las siguientes ecuaciones.

$$X/M = \frac{(12693.0 N_2 - 279.246 N_1 V_1)}{M}$$

En donde  $N_1$  es la normalidad del tiosulfato.  $N_2$  es la del yodo,  $V_1$  es el volumen de tiosulfato utilizado en la titulación (ml), y  $M$  es el peso de la muestra de carbón (g).

$$C_1 = \frac{N_1 V}{50}$$

Si el valor de  $C_1$  para las muestras no esta dentro del rango de 0.008 N a 0.04N, hay que repetir el procedimiento, utilizando distintas cantidades de muestra de CA.

Usando papel log-log, se gráfica  $X/M$  en las ordenadas contra  $C_1$  en las abscisas. Por mínimos cuadrados se calcula la ecuación de la recta que mejor representa a las tres dosis de CA; el número de yodo.  $NI_1$  es el valor de  $X/M$  que corresponde a una concentración residual de  $C_1$  de 0.02N.

NOTA: Estimación del peso de las muestras de carbón.

$$M = \frac{(12693.0 N_1 - 13962.3 C_1)}{NI_1}$$

En donde  $NI_1$  es el número de yodo estimado de la muestra. Las tres dosis de carbón normalmente se calculan con valores de  $C_1$  de 0.01, 0.02, 0.03.

El número de yodo estimado para el cálculo de las masas son los siguientes;

$NI_1$  para el LQ1000 es de 1000 mg/g

$NI_1$  para el Coque es de 188 mg/g

$NI_1$  para el Coque activado se tomo un promedio entre los dos que es 800 mg/g.

**Técnica de azul de metileno.** Norma ASTM – D 3037 para la determinación de área superficial.

Material y reactivos.

- Azul de metileno grado analítico.
- Ácido acético
- Agua destilada
- Balanza analítica
- Espátula
- Vidrio de reloj
- Matraz aforado de un litro
- Bureta de 50ml
- Matraces aforados de 100ml

Prueba de adsorción de azul de metileno. Para obtener la ecuación que relacione la concentración remanente de la adsorción por el carbón del azul de metileno, se hizo una curva de calibración de la siguiente manera: se prepara una solución de azul de metileno pesando 0.6g de azul de metileno y disolviéndolos en 50ml de ácido acético, aforando luego con agua destilada a 1L., con lo que se obtuvo una solución de  $6 \times 10^{-6}$  g de azul de metileno/mL.

En un matraz erlenmeyer de 100 ml previamente tarado se adiciona aproximadamente 0.2g de carbón seco, agregando después 120 ml de solución de azul de metileno (CI). Se agita durante 15 minutos se filtra, el filtrado es corrido en el espectrofotómetro obteniendo las adsorbancias (N) y esta se sustituye en la ecuación (M) que da (CI).

$$CI - Cf = Cad$$

En la que

CI = concentración inicial

Cf = concentración final

Cad = concentración adsorbida.

### **Determinación del área específica**

Teniendo una serie de carbones, se determinan las áreas específicas utilizando la ecuación de BET y la adsorción de azul de metileno. Se obtuvo una línea recta que muestra la relación del poder adsorbente medido por el área específica y el que se mide por medio del azul de metileno y por ende la relación entre área y poder decolorante de los carbones estudiados.

## **ANEXO B**

### **Técnica de espectrofotometría de absorción atómica por el Método de regeneración de hidruros**

Las muestras son acidificadas a un pH menor de 2 con ácido nítrico.

Toma una alícuota para el análisis por espectrofotometría de absorción atómica, de acuerdo al método de regeneración de hidruros.

La técnica de regeneración de hidruros se asemeja en algo al sistema de muestreo para mercurio por vapor frío. En esta técnica los hidruros gaseosos de ciertos metales son químicamente producidos por adición de borohidruros de sodio a 25 mililitros de muestra de reacción. Los hidruros gaseosos e hidrógeno producidos, son arrastrados por argón hacia un tren de llamas aire-argón-hidrógeno o, alternativamente, en una celda de cuarzo calentada. Se dispone de equipos manuales o automáticos para generar hidruros.

Cuando el vapor de la muestra es automatizado en la llama o en la celda calentada, se produce una señal de forma Gaussiana, Altura de la cual es proporcional a la cantidad del analito en la muestra.

Los elementos determinables utilizando la técnica de regeneración de hidruros gaseosos son de importancia ambiental o de interés toxicológico, por lo que los impresionantes pequeños límites de detección hacen que estos métodos sean atractivos para este tipo de aplicación.



## ANEXO C

Limites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano y tratamientos para cumplirlos, de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994

Los tratamientos listados son los que reconoce la norma NOM-127-SSA1-1994 para cumplir con los limites permisibles de calidad del agua. Esta norma se publico en la ciudad de México en el Diario Oficial de la federación del 18 de enero de 1996.

Características bacteriológicas	Límite permisible	Tratamientos
Organismos coliformes totales	2NMP/100ml	Cloro, compuestos de cloro, ozono, luz ultravioleta
Organismos coliformes fecales	2UFC/100ml	Igual que el anterior

NMP = Número más probable

UFC = Unidad formadora de colonias- Técnica de filtración por membrana

Características físicas y organolépticas	Límite permisible	Tratamientos
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto	Coagulación-floculación-precipitación, cualquiera o la combinación de ellos; carbón activado, oxidación
Olor y sabor	Agradable(se aceptaran aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores)	Igual que el anterior
Turbiedad	5 UTN o su equivalente en otro método	Igual que el anterior

UTN= unidades de turbiedad nefelométricas.

Características Químicas	Límite permisible (mg/L)	Tratamientos
Aluminio	0.20	Intercambio iónico, ósmosis inversa
Arsénico	0.05	Intercambio iónico, ósmosis inversa
Bario	0.70	Intercambio iónico, ósmosis inversa

Características Químicas	Limite permisible (mg/L)	Tratamientos
Cadmio	0.005	Intercambio iónico, ósmosis inversa
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	0.07	Intercambio iónico, ósmosis inversa
Cloro libre residual	0.20-1.50	C:A
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.0	Intercambio iónico, ósmosis inversa
Cobre	2.00	Intercambio iónico, ósmosis inversa
Cromo total	0.05	Intercambio iónico, ósmosis inversa
Dureza total (como CaCO <sub>2</sub> )	500.00	Ablandamiento químico, intercambio iónico
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001	C:A oxidación con ozono
Hierro	0.30	Oxidación-filtración, intercambio iónico, ósmosis inversa
Fluoruros	1.50	Ósmosis inversa, coagulación química
Manganeso	0.15	Oxidación-filtración, intercambio iónico,
Mercurio	0.001	Procesos convencionales C-S-P-F cuando se tengan hasta 10microgramo/l
Nitratos	10.00	Intercambio iónico C-F-S-F
Nitritos	0.050	Igual que el anterior
Nitrógeno amoniacal	0.50	C-F-S-F desgasificación
PH (en unidades de pH)	6.5-8.5	Neutralización
Plomo	9.925	Intercambio iónico, ósmosis inversa
Sodio	200.00	Intercambio iónico
Sólidos disueltos totales	1000.00	C-F-S-F intercambio iónico
Sulfatos	400.00	Intercambio iónico ósmosis inversa
Sustancia activas al azul de metileno	0.50	CA

Características radiactivas	Limite permisible (becquerel / l)
Radiactividad alfa global	0.1
Radiactividad beta global	1.0

Limites permisibles de calidad del agua purificada envasada, de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-041-SSA1-1994.

La norma NOM-041-SSA1-1994 se publica en la ciudad de México en el Diario Oficial de la Federación del 24 de marzo de 1995.

<b>Características fisicoquímicas</b>	<b>Limites permisibles(mg/g)</b>
Alcalinidad total	300.00
Fierro	0.30
Mercurio	0.001
Oxigeno consumido en el medio ácido	0.40

## ANEXO D

## Costos de producción para carbón activado a partir de Coque de petróleo y ácido fosfórico

Tabla D1 Costos de producción para coque de petróleo y ácido fosfórico

Año	2001	2002	2003	2004	2005
Carbón Activado producido (Ton.)	3000	3000	3500	3500	4000

## Costos directos.

Coque de petróleo	-	-	-	-	-
Ácido fosfórico	\$29295000.00	\$31345650.00	\$38962643.00	\$41690028.00	\$50028034.00
Energía eléctrica	\$6146280.00	\$6576519.00	\$7036875.00	\$7529456.00	\$9035347.00
Combustible	\$6885000.00	\$7366950.00	\$7882636.00	\$8434420.00	\$10121304.00
Agua	\$24375.00	\$26081.00	\$32340.00	\$34604.00	\$41524.00
Mat. de consumo y refacciones.	\$11104	\$11881.00	\$14768.00	\$15802.00	\$18926.00
Mano de obra directa.	\$1840800.00	\$1969656.00	\$5448282.00	\$5829662.00	\$6237738.00
Subtotal	\$44202559.00	\$47296737.00	\$51377544.00	\$63533951.00	\$75482909

## Costos indirectos.

Depreciación y amortización	\$4731660.00	\$5015559.00	\$5366648.00	\$5742313.00	\$6144275
Mantenimiento	\$135413.00	\$144891.00	\$155033.00	\$165885.00	\$177497.00
Seguros de la planta	\$666910.00	\$713593.00	\$763544.00	\$816992.00	\$874181.00
Mano de obra indirecta	\$2121600.00	\$2270112.00	\$2429020.00	\$2599051.00	\$2780985.00
Subtotal	\$7645583.00	\$8144155.00	\$8714245.00	\$9324241.00	\$9976938.00
Costos totales de producción	\$51857142.00	\$55440892.00	\$70091789.00	\$72858192.00	\$85459847.00
Costos unitarios de (\$/Ton.)	\$17286.00	\$18480.00	\$20026.00	\$20817.00	\$21365.00

## Costos de producción

Año	2006	2007	2008	2009	2010
Carbón Activado producido (Ton.)	4000	4000	4000	4000	4000

## Costos directos.

Coque de petróleo	-	-	-	-	-
Acido fosfórico	\$53529996.00	\$57277096.00	\$61286493.00	\$65576547.00	\$70166905.00
Energía eléctrica	\$9667821.00	\$10344568.00	\$11068688.00	\$11843496.00	\$12672541.00
Combustible	\$10829795.00	\$11587881.00	\$12399033.00	\$13266965.00	\$14195652.00
Agua	\$44431.00	\$47541.00	\$50869.00	\$54430.00	\$58240.00
Mat. de consumo y refacciones.	\$20289.00	\$21709.00	\$23229.00	\$24855.00	\$26595.00
Mano de obra directa.	\$6674380.00	\$7141587.00	\$7641498.00	\$8176403.00	\$8748751.00
Subtotal	\$80766712.00	\$86420382.00	\$92469810.00	\$98942696.00	\$105868684.00

## Costos indirectos.

Depreciación y amortización	\$6574374.00	\$7034580.00	\$7527000.00	\$8053890.00	\$8617662.00
Mantenimiento	\$189922.00	\$203217.00	\$217442.00	\$232663.00	\$248949.00
Seguros de la planta	\$935374.00	\$1000850.00	\$1070909.00	\$1145873.00	\$1226084.00
Mano de obra indirecta	\$2975654.00	\$3183950.00	\$3406826.00	\$3645304.00	\$3900475.00
Subtotal	\$10675324.00	\$11422597.00	\$12222177.00	\$13077730.00	\$13993170.00
Costos totales de producción	\$91442036.00	\$97842979.00	\$104691987.00	\$112020426.00	\$119861854.00
Costos unitarios de (\$/Ton.)	\$22860.00	\$24461.00	\$26173.00	\$28005.00	\$29965.00

## Costos de producción para carbón activado a partir de Coque de petróleo y hidróxido de sodio

Tabla D2 Costos de producción para coque de petróleo e hidróxido de sodio

Año	2001	2002	2003	2004	2005
Carbón Activado producido (Ton.)	3000	3000	3500	3500	4000

### Costos directos.

Coque de petróleo	-	-	-	-	-
Hidróxido de sodio	\$10395000.00	\$11122650.00	\$13825454.00	\$14793235.00	\$17751882.00
Energía eléctrica	\$6146280.00	\$6576519.00	\$7036875.00	\$7529456.00	\$9035347.00
Combustible	\$6885000.00	\$7366950.00	\$7882636.00	\$8434420.00	\$10121304.00
Agua	\$24375.00	\$26081.00	\$32340.00	\$34604.00	\$41524.00
Mat. de consumo y refacciones.	\$11104	\$11881.00	\$14768.00	\$15802.00	\$18926.00
Mano de obra directa.	\$1840800.00	\$1969656.00	\$5448282.00	\$5829662.00	\$6237738.00
Subtotal	\$25302559.00	\$27073737.00	\$34240355.00	\$36637158.00	\$43206757.00

### Costos indirectos.

Depreciación y amortización	\$4731660.00	\$5015559.00	\$5366648.00	\$5742313.00	\$6144275
Mantenimiento	\$135413.00	\$144891.00	\$155033.00	\$165885.00	\$177497.00
Seguros de la planta	\$666910.00	\$713593.00	\$763544.00	\$816992.00	\$874181.00
Mano de obra indirecta	\$2121600.00	\$2270112.00	\$2429020.00	\$2599051.00	\$2780985.00
Subtotal	\$7645583.00	\$8144155.00	\$8714245.00	\$9324241.00	\$9976938.00
Costos totales de producción	\$32948142.00	\$35217892.00	\$42954600.00	\$45961399.00	\$53183695.00
Costos unitarios de (\$/Ton.)	\$10983.00	\$11739.00	\$12273.00	\$13132.00	\$13296.00

## Costos de producción.

Año	2006	2007	2008	2009	2010
Carbón Activado producido (Ton.)	4000	4000	4000	4000	4000

## Costos directos.

C0que de petr0leo	-	-	-	-	-
Hidróxido de sodio	\$18994514.00	\$20324130.00	\$21746819.00	\$23269096.00	\$24897933.00
Energía eléctrica	\$9667821.00	\$10344568.00	\$11068688.00	\$11843496.00	\$12672541.00
Combustible	\$10829795.00	\$11587881.00	\$12399033.00	\$13266965.00	\$14195652.00
Agua	\$44431.00	\$47541.00	\$50869.00	\$54430.00	\$58240.00
Mat. de consumo y refacciones.	\$20289.00	\$21709.00	\$23229.00	\$24855.00	\$26595.00
Mano de obra directa.	\$6674380.00	\$7141587.00	\$7641498.00	\$8176403.00	\$8748751.00
Subtotal	\$46231230.00	\$49467416.00	\$52930136.00	\$56635245.00	\$60599712.00

## Costos indirectos.

Depreciación y amortización	\$6574374.00	\$7034580.00	\$7527000.00	\$8053890.00	\$8617662.00
Mantenimiento	\$189922.00	\$203217.00	\$217442.00	\$232663.00	\$248949.00
Seguros de la planta	\$935374.00	\$1000850.00	\$1070909.00	\$1145873.00	\$1226084.00
Mano de obra indirecta	\$2975654.00	\$3183950.00	\$3406826.00	\$3645304.00	\$3900475.00
Subtotal	\$10675324.00	\$11422597.00	\$12222177.00	\$13077730.00	\$13993170.00
Costos totales de producción	\$56906554.00	\$60890013.00	\$65152313.00	\$69712975.00	\$74592882.00
Costos unitarios de (\$/Ton.)	\$14227.00	\$15223.00	16288.00	\$17428.00	\$18648.00