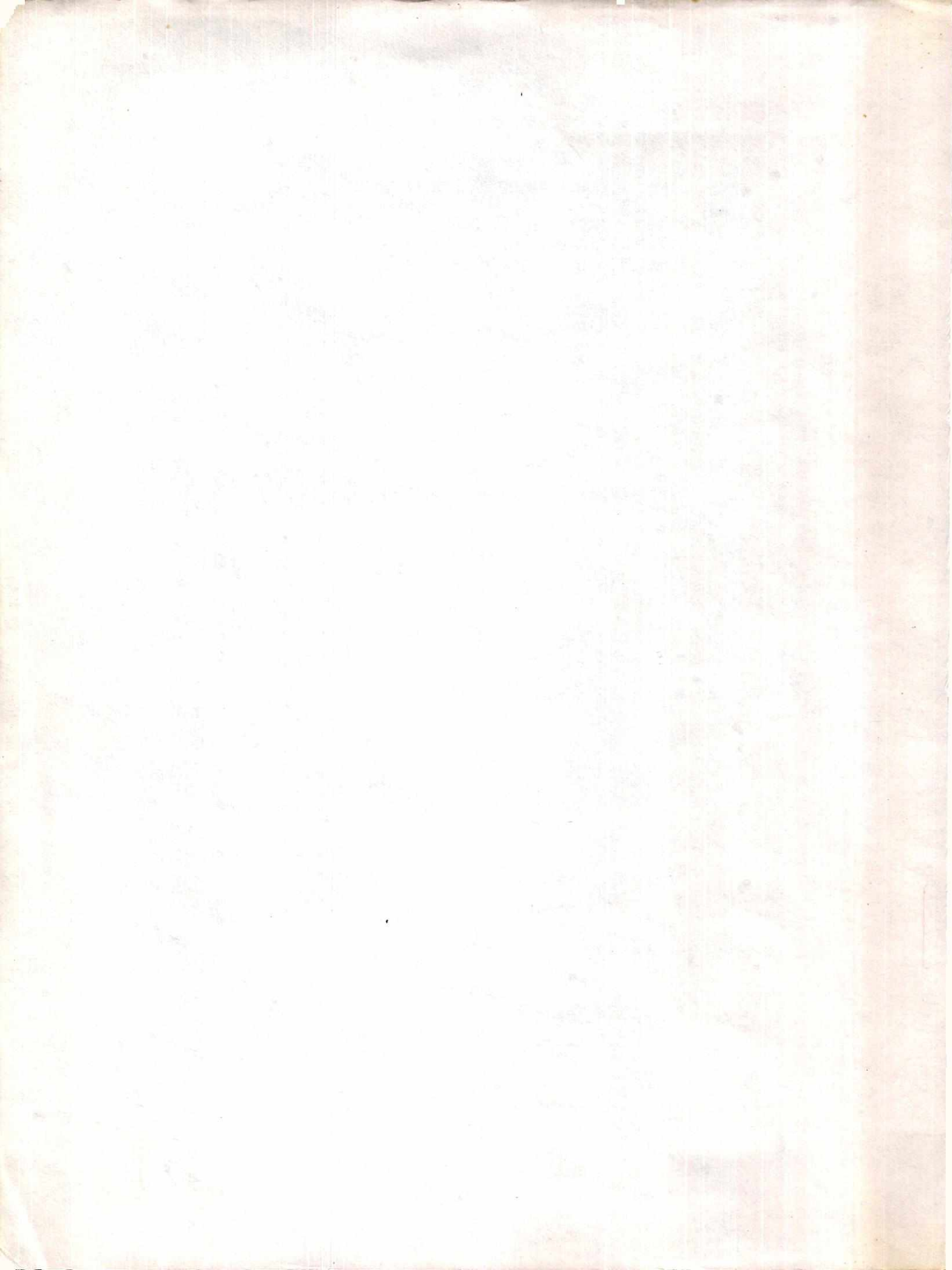


PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO  
A PARTIR DE LA CASCARA DE LA  
SEMILLA DEL HULE, HEVEA BRASILIENSIS



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades

**BIBLIOTECA**  
**DE LA**  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO  
A PARTIR DE LA CASCARA DE LA  
SEMILLA DEL HULE, HEVEA BRASILIENSIS

ANA SILVIA COLMENARES SAMAYOA

Trabajo de investigación presentado para optar  
al grado académico de

Licenciada en Química

Guatemala

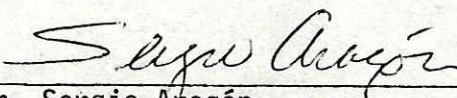
1984

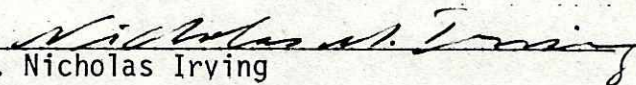


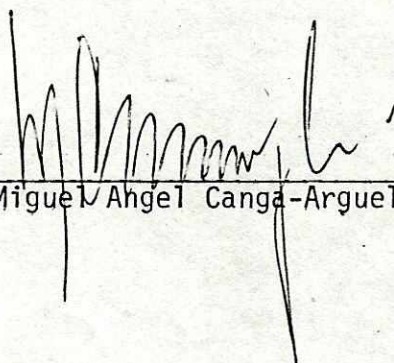
Vo. Bo.

(f)   
Ingeniero Miguel Angel Canga-Arguelles  
Asesor

Tribunal

(f)   
Dr. Sergio Aragón

(f)   
Dr. Nicholas Irving

(f)   
Ing. Miguel Angel Canga-Arguelles

Fecha de aprobación: 6 de septiembre de 1984.



## RESUMEN

En este trabajo se estudiaron las propiedades características del carbón obtenido de la cáscara de la semilla del hule, y su capacidad de adsorción en función de los números de yodo, azul de metileno y eritrosina. Con el material seco, limpio y fraccionado, se hicieron trece carbonizaciones de la siguiente manera:

- a) a 650°C durante 30 minutos, con material de cuatro diferentes tamaños de partículas sin impregnar;
- b) a 650 °C durante 30 minutos, con material impregnado en partícula de tamaño 0.47 mm, (30 mesh). La impregnación se hizo con solución de cloruro de zinc de 1.8 g/ml. a temperaturas de 4, 25 y 94 °C durante 60 minutos, y a temperatura de 25°C durante 60, 120 y 180 minutos;
- c) a temperaturas de 600, 650 y 700°C durante 30 minutos, y a 650 °C durante 30, 60 y 90 minutos con el material del tamaño de partícula mencionado, previamente impregnado a 94°C durante 60 minutos.

Los carbones se evaluaron usando algunos de los métodos estándares publicados por ASTM que se mencionan: pH, porcentaje de humedad, contenido total de cenizas, densidad aparente, medida de la adsorción del azul de metileno, medida de la adsorción del yodo, y para el grupo de carbones (c) se utilizó la medida de la adsorción de la eritrosina.

Mediante los resultados se encontró que los carbones producidos presentan características similares, y en algunos casos, mejores que las de los carbones comerciales utilizados comunmente por la industria guatemalteca.

En resumen, la metodología utilizada fue satisfactoria para el propósito del trabajo.

## CONTENIDO

|  | Páginas |
|--|---------|
| RESUMEN  |         |
| I. GENERALIDADES SOBRE EL CARBON ACTIVADO                                  | 1       |
| II. METODOS EMPLEADOS PARA MEDIR LOS DIAMETROS Y LAS AREAS DE LOS POROS    | 13      |
| A. Diámetros de los microporos   | 13      |
| B. Diámetros de los macroporos   | 13      |
| C. Área de la superficie   | 14      |
| III. APLICACIONES DEL CARBON ACTIVADO                                      | 17      |
| IV. FUENTES USUALES DE MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO | 19      |
| V. METODOS USUALES PARA LA PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO                   | 25      |
| VI. OBJETIVOS  | 27      |
| VII. JUSTIFICACION   | 29      |
| VIII. METODOLOGIA  | 31      |
| IX. MATERIALES   | 35      |
| X. RESULTADOS  | 37      |
| XI. DISCUSION DE RESULTADOS  | 83      |
| XII. CONCLUSIONES  | 93      |
| XIII. RECOMENDACIONES  | 95      |
| XIV. BIBLIOGRAFIA  | 97      |

## APENDICES

|   |     |
|---|-----|
| A. Descripción de los métodos utilizados en la evaluación de las muestras de carbón.          | 101 |
| B. Curvas de calibración empleadas en la dosificación del azul de metileno y la eritrosina    | 105 |
| C. Estimación de incertidumbre en los valores determinados experimentalmente en este estudio. | 109 |

## LISTA DE FIGURAS

| Figuras  | Página |
|--|--------|
| 1.1 Poros en el carbón activado                  | 5      |
| 1.2 Fotografía electrónica de un carbón activado | 7      |



## LISTA DE GRAFICAS

### Gráficas

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.1   | Area acumulada contra diámetros de poros para tres diferentes carbones   | 8  |
| 1.2   | Isotermas de adsorción no lineales   | 11 |
| 10.1  | Densidad aparente en función del tamaño de las partículas usadas en la producción de carbón activado.                    | 38 |
| 10.2  | Porcentaje de humedad en función del tamaño de las partículas  | 39 |
| 10.3  | Porcentaje de rendimiento en función del tamaño de las partículas usadas como materia prima para carbón activado         | 40 |
| 10.4  | Isotermas de adsorción del azul de metileno en cuatro muestras de carbón de diferente tamaño de partícula                | 42 |
| 10.5  | Número de azul de metileno en función del tamaño de partículas utilizadas como materia prima en la producción del carbón | 44 |
| 10.6  | Número de yodo contra tamaño de partícula usada como materia prima en la producción de carbón                            | 45 |
| 10.7  | Porcentajes de rendimiento en función de las temperaturas de impregnación  | 47 |
| 10.8  | Porcentajes de rendimiento en función de los tiempos de impregnación   | 48 |
| 10.9  | Porcentaje de cenizas en función de la temperatura de de impregnación  | 49 |
| 10.10 | Porcentajes de cenizas en función de los tiempos de impregnación   | 50 |
| 10.11 | Porcentaje de humedad en función de los tiempos de impregnación  | 50 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 10.12 | Porcentajes de humedad en función de las temperaturas de impregnación   | 51 |
| 10.13 | Isotermas de adsorción del azul de metileno en cinco muestras de carbón activado                                      | 53 |
| 10.14 | Número de azul de metileno en función del tiempo de impregnación  | 55 |
| 10.15 | Número de yodo en función del tiempo de impregnación  | 56 |
| 10.16 | Número de azul de metileno en función de la temperatura de impregnación   | 57 |
| 10.17 | Número de yodo en función de la temperatura de impregnación   | 58 |
| 10.18 | Porcentajes de rendimiento en función de las temperaturas de carbonización  | 60 |
| 10.19 | Porcentajes de rendimiento en función de los tiempos de carbonización   | 60 |
| 10.20 | Porcentajes de humedad en función de la temperatura de carbonización  | 62 |
| 10.21 | Porcentajes de humedad en función del tiempo de carbonización   | 62 |
| 10.22 | Porcentajes de cenizas en función de la temperatura de carbonización  | 63 |
| 10.23 | Porcentaje de cenizas en función de los tiempos de carbonización  | 63 |
| 10.24 | Isotermas de adsorción del azul de metileno en cuatro muestras de carbón activado a diferentes tiempos y temperaturas | 65 |
| 10.25 | Isotermas de adsorción de la eritrosina en cuatro muestras de carbón activado a diferentes tiempos y temperaturas     | 67 |
| 10.26 | Números de azul de metileno en función de la temperatura de carbonización   | 70 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 10.27 | Números de azul de metileno en función del tiempo de carbonización  | 70 |
| 10.28 | Números de yodo en función de la temperatura de carbonización   | 71 |
| 10.29 | Números de yodo en función del tiempo de carbonización  | 71 |
| 10.30 | Isotermas de adsorción del azul de metileno y la eritrosina en dos muestras de carbones activados comerciales | 74 |
| 10.31 | Áreas acumuladas en función de los diámetros de poros para seis muestras de carbón activado                   | 77 |



## LISTA DE CUADROS

### Cuadros

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.1   | Diámetros de poro en los que pueden penetrar ciertas sustancias y la ecuación que relaciona el número de adsorción de ellas con el área de la superficie. | 16 |
| 4.1   | Contenido de cenizas de algunos materiales usados en la producción de carbón activado   | 19 |
| 10.1  | Tamaño de las partículas, densidad aparente y porcentaje de humedad para cuatro muestras de carbón  | 38 |
| 10.2  | Porcentaje de rendimiento, porcentaje de cenizas y pH de cuatro muestras de carbón  | 39 |
| 10.3  | Datos experimentales utilizados en la obtención del número de azul de metileno  | 41 |
| 10.4  | Líneas de regresión calculadas a partir de los datos del cuadro 10.3 y utilizadas para obtener el número de azul de metileno                              | 43 |
| 10.5  | Número de azul de metileno y número de yodo para cuatro muestras de carbón  | 43 |
| 10.6  | Temperaturas y tiempos de impregnación y porcentajes de rendimiento de cinco muestras de carbón   | 46 |
| 10.7  | Densidad aparente, porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas y pH para cinco muestras de carbón  | 49 |
| 10.8  | Datos experimentales utilizados en la obtención del número de azul de metileno  | 52 |
| 10.9  | Lineas de regresión calculadas con los datos del cuadro 10.8 y utilizadas en la obtención del número de azul de metileno                                  | 54 |
| 10.10 | Número de azul de metileno y número de yodo para cinco muestras de carbón   | 54 |
| 10.11 | Temperaturas y tiempos de carbonización y porcentajes de rendimiento de cuatro muestras de carbón   | 59 |
| 10.12 | Densidad aparente, porcentajes de cenizas, porcentajes de humedad y pH para cuatro muestras de carbón   | 61 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 10.13 | Datos experimentales utilizados en la obtención del número de azul de metileno   | 64 |
| 10.14 | Datos experimentales utilizados en la obtención del número de eritrosina   | 66 |
| 10.15 | Líneas de regresión calculadas a partir de datos de los cuadros 10.13 y 10.14, y utilizados en la obtención del número de azul de metileno y número de eritrosina                          | 68 |
| 10.16 | Número de yodo, número de azul de metileno y número de eritrosina para cuatro muestras de carbón producidas a diferentes tiempos y temperaturas  | 69 |
| 10.17 | Datos experimentales utilizados en la obtención del número de azul de metileno para dos muestras comerciales de carbón   | 73 |
| 10.18 | Datos experimentales utilizados en la obtención del número de eritrosina para dos muestras comerciales de carbón   | 73 |
| 10.19 | Líneas de regresión calculadas a partir de los datos de los cuadros 10.17 y 10.18, y utilizados en la obtención del número de eritrosina y de azul de metileno de dos carbonos comerciales | 75 |
| 10.20 | Número de yodo, número de azul de metileno y número eritrosina para carbonos activados comerciales   | 75 |
| 10.21 | Area en los poros mayores que 10,15 y 19 Å, para todas las muestras preparadas de carbón y dos muestras comerciales  | 76 |
| 10.22 | Condiciones de preparación de los carbonos producidos en el laboratorio  | 78 |
| 10.23 | Porcentaje de rendimiento, densidad aparente, porcentaje de cenizas y porcentaje de humedad de los carbonos estudiados   | 79 |
| 10.24 | Número de yodo, número de azul de metileno y número de eritrosina para las muestras estudiadas de carbón.  | 80 |
| 10.25 | Especificaciones de los carbonos comerciales activados, dadas por los fabricantes  | 81 |

## I. GENERALIDADES SOBRE EL CARBON ACTIVADO

El término carbón activado es un concepto genérico que se refiere a aquellas sustancias sólidas de color negro, consistencia friable y porosa cuando están en trozos o fragmentos fácilmente pulverizables y de gran superficie específica, cuya propiedad más sobresaliente es su capacidad de adsorción. Ninguna de ellas se caracteriza por una fórmula específica, salvo el símbolo del carbono, que constituye la mayor parte de su masa. Este se encuentra en supuesta combinación con elementos metálicos con los que se estructura favorablemente durante el proceso de activación para mejorar su capacidad adsorptiva (1).

La adsorción se explica en términos de la tensión superficial del sólido. Las partículas, sean átomos o moléculas, que conforman el interior de los sólidos se encuentran sujetas a fuerzas iguales en todas direcciones, mientras que las que están en la superficie se encuentran sujetas a fuerzas no balanceadas. Las fuerzas no balanceadas pueden ser satisfechas si otras partículas con carga se unen a la superficie del sólido. Cuando las fuerzas de enlace son relativamente débiles, se conocen como fuerzas de Van der Waals. Al fenómeno se le denomina adsorción física. En este caso las partículas del adsorbato, la sustancia que es adsorbida, se unen al adsorbente formando capas sucesivas que aumentan cuando la concentración del adsorbato es mayor. Las partículas adsorbidas pueden ser fácilmente liberadas (2).

Cuando las fuerzas de enlace son de mayor magnitud, se forman compuestos más estables como producto de la reacción entre las partículas adsorbidas y la superficie del adsorbente. En este caso se involucra un mayor cambio de energía para formar el nuevo compuesto. Al fenómeno se le llama adsorción química. La reversibilidad del proceso depende de la naturaleza química del compuesto que se forma y de las condiciones bajo las cuales opera la adsorción (3).

Ambos tipos de adsorción dependen principalmente de las características físicas y químicas del adsorbente, como lo son: 1. su estructura y naturaleza química, 2. el área total de la superficie expuesta, y 3. el tamaño de los poros en cuanto a diámetros y longitudes.

#### 1. Estructura y Naturaleza Química del Carbón Activado.

La estructura del carbón activado no se conoce con certeza, pero los estudios de difracción de Rayos X muestran que el coque, el carbón de leña y el carbón activado, frecuentemente llamados carbones amorfos, tienen aparentes características cristalinas. Sin embargo, no exhiben en forma definitiva características usuales asociadas al estado cristalino como lo son ángulos, caras y ejes. El polvo de este material está formado por partículas de dimensiones submicroscópicas llamadas cristalitos. La estructura del carbón amorfo aparece como formada por platos planos donde los átomos de carbono están arreglados en redes hexagonales. Cada uno de los átomos, excepto los de los bordes, están sostenidos por uniones covalentes a otros tres átomos de carbono. Los cristalitos están formados por dos o más de estos platos localizados uno arriba del otro. (1,4).

La superficie pura del carbón se considera como no polar, pero en la práctica se presentan complejos carbón-oxígeno que dan como resultado una superficie relativamente polar. En general, y por esta razón, el carbón activado no es un adsorbente adecuado para electrolitos inorgánicos, sino para compuestos aromáticos y alifáticos no saturados (5).

Algunos carbones, especialmente los de origen vegetal, contienen cenizas y su superficie es alcalina con propiedades hidrofílicas. Las superficies polares de esta clase pueden influir favorablemente en la adsorción de sustancias polares tales como compuestos orgánicos no saturados, tintes y sustancias coloreadas (1). En el carbón activado, la naturaleza química de la superficie tiene menor importancia en relación a la magnitud del área que ocupa, que es el parámetro de mayor relevancia (6), y a los diámetros y longitudes de los poros.

## 2. Área total de la superficie expuesta.

El área total de la superficie del carbón activado es muy grande en relación a su masa. El rango de variación es de 450 a 1800 m<sup>2</sup>/g (7). La superficie efectiva de adsorción, que depende del tamaño de los poros; solamente es una fracción de la superficie total.

## 3. Tamaño de los poros en cuanto a diámetros y longitudes.

De acuerdo con su tamaño, los poros en el carbón activado pueden dividirse en dos clases: los microporos cuyos diámetros van desde 10 hasta 1000 Å; y los macroporos cuyos diámetros son mayores de 1000 Å. Los primeros son los que tienen más importancia porque suministran casi toda la superficie disponible para la adsorción. El sistema de microporos se desarrolla durante el proceso de activación. La formación de los macro-

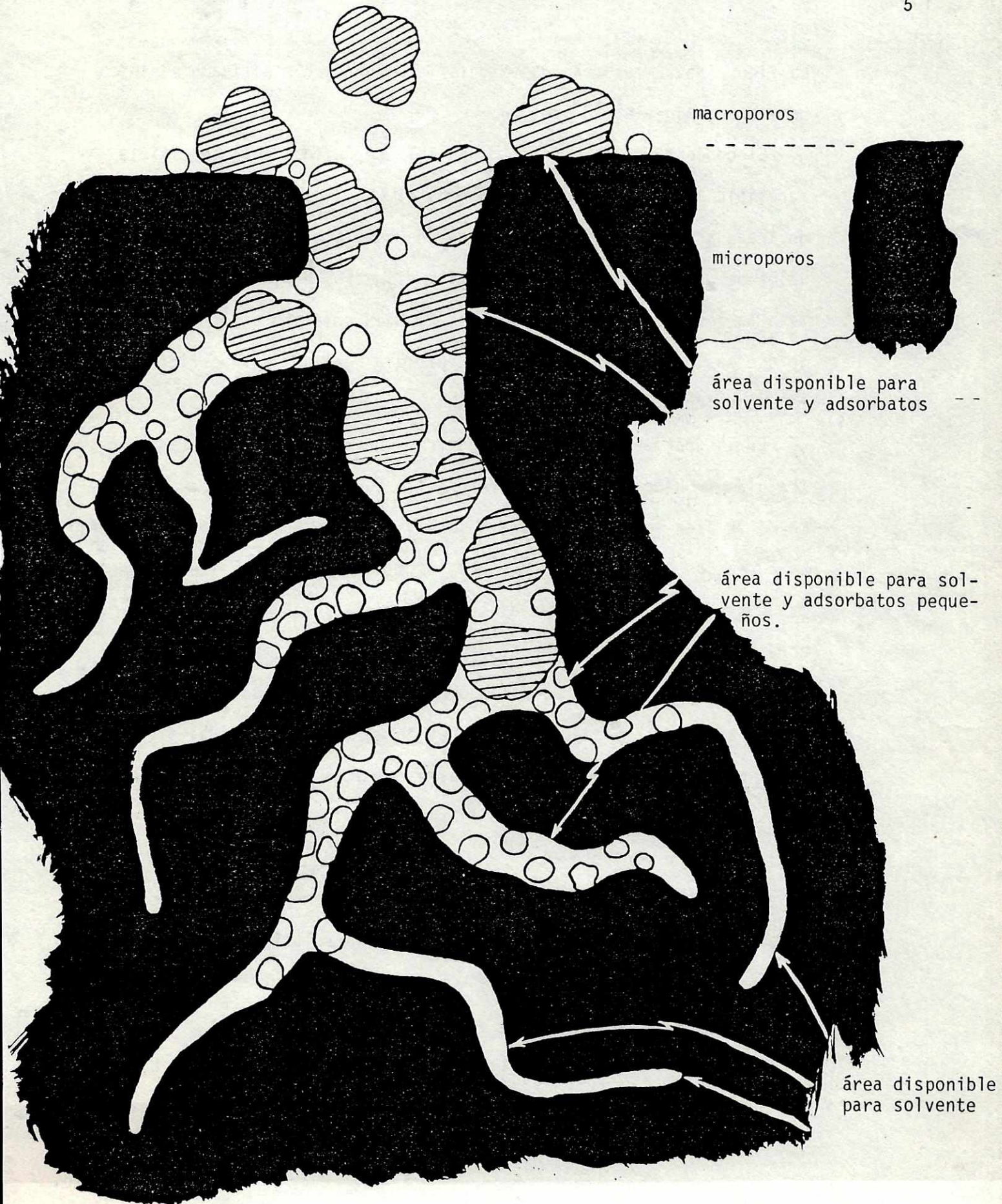
poros depende del material original y de los procesos preliminares de manufactura. Estos poros contribuyen en menor grado a aumentar el área total, pero facilitan el paso de las partículas a los microporos (7).

El conocimiento de la distribución del tamaño de los poros en los carbones activados es de importancia para el estudio y evaluación de los mismos, y la interpretación de la adsorción. Para determinar completamente la distribución del tamaño de los poros es necesario conocer lo siguiente:

- a. El volumen total que ocupan, que generalmente varía entre 0.7 y 1.8  $\text{cm}^3/\text{g}$  (10).
- b. La distribución del tamaño de los microporos y
- c. La distribución del tamaño de los macroporos.

La mayor contribución que ofrece el área del carbón activado se localiza en los poros de dimensiones moleculares. Hay moléculas de adsorción que por su tamaño no pueden penetrar en los poros que son menores de cierto diámetro crítico, debido a factores estéricos (de volumen). El área efectiva para la adsorción está sólo en los poros en los que las moléculas pueden penetrar. La figura No. 1 muestra un esquema de los poros del carbón activado en los que dos clases moléculas de adsorbato en una solución compiten por el área de adsorción. Los microporos no están totalmente bloqueados por moléculas grandes, y permiten el paso de moléculas pequeñas debido al constante movimiento de las moléculas y a la irregularidad de la forma, tanto de ellos como de las moléculas grandes. Las moléculas pequeñas poseen una mayor movilidad, lo cual les permite penetrar entre los espacios de las moléculas mayores (7).

Figura 1. Poros en el carbón activado (6)



La figura No. 2 muestra una fotografía de un carbón activado visto con un microscopio electrónico (6).

El concepto de superficie disponible se refiere a la superficie accesible a las moléculas del adsorbato. Se ilustra mediante gráficas de áreas acumuladas (áreas de poros cuyos diámetros son mayores que el valor de un diámetro dado) contra los diámetros de los poros. El objetivo es conocer la distribución del área en relación a los diámetros, lo que nos permite saber la disponibilidad real de la superficie para la adsorción.

En la gráfica No.1 se muestran tres curvas de área acumulada contra diámetros de poros. El carbón de la curva uno tiene la mayor parte de su área localizada en poros cuyos diámetros son menores que 10 Å. La curva dos se refiere a un carbón cuya mayor parte del área se encuentra distribuida en poros de diámetros entre 30 y 40 Å. El carbón de la curva tres tiene la mayor cantidad de su área localizada en poros de diámetros entre 10 y 20 Å. La adsorción también depende de las cantidades de adsorbente y adsorbato que hay en un volumen dado del sistema, así como de las características físicas y químicas de ambos, las propiedades de la fase líquida cuando el sistema es sólido-líquido (solución), y el tiempo de contacto.

Entre las características del adsorbato podemos mencionar las siguientes: la estructura de las moléculas, la solubilidad del adsorbato en el solvente y su estado de ionización (6). Entre las propiedades de la fase líquida son de importancia la temperatura y el pH. Un aumento en la temperatura tiende a disminuir la adsorción. La tem-

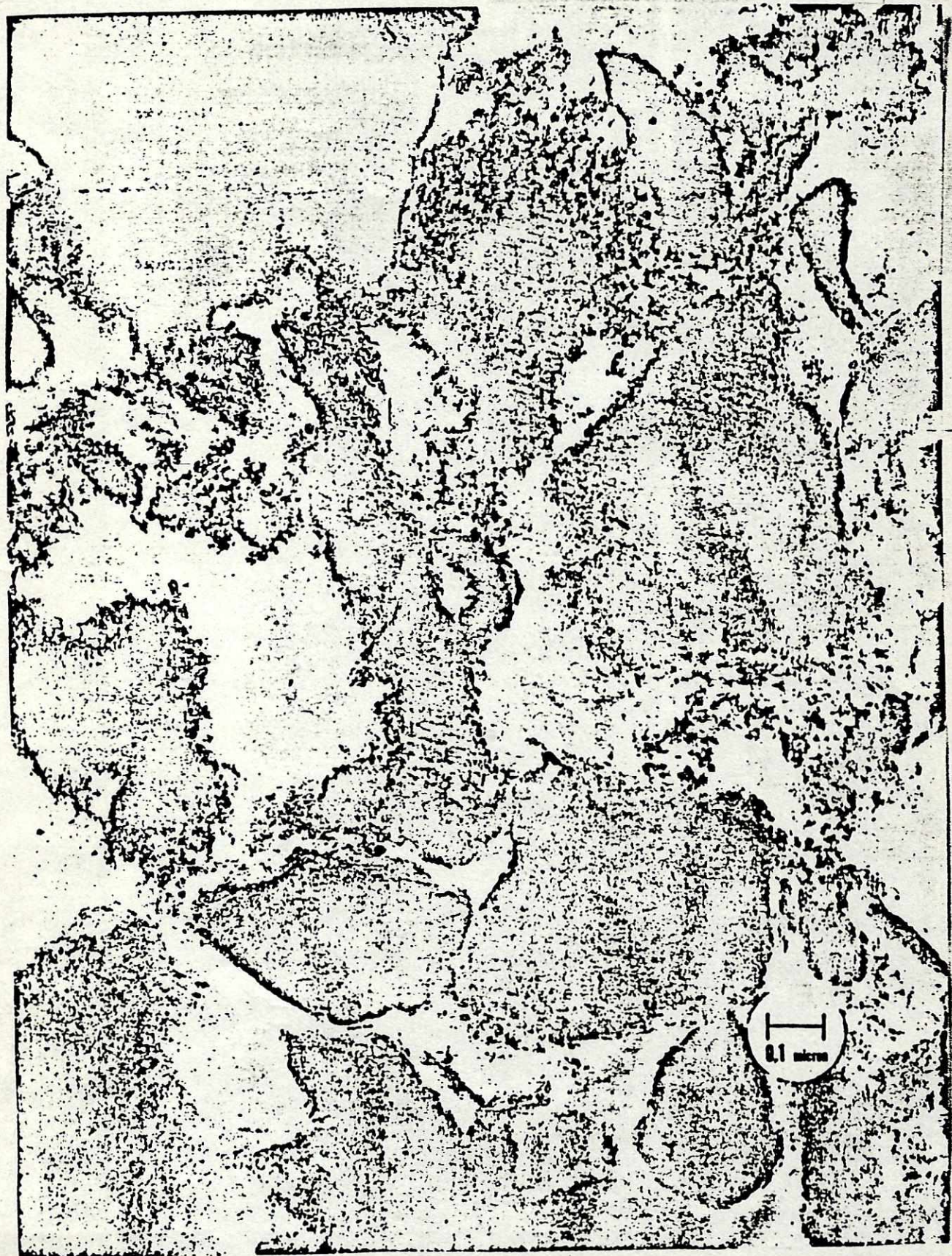
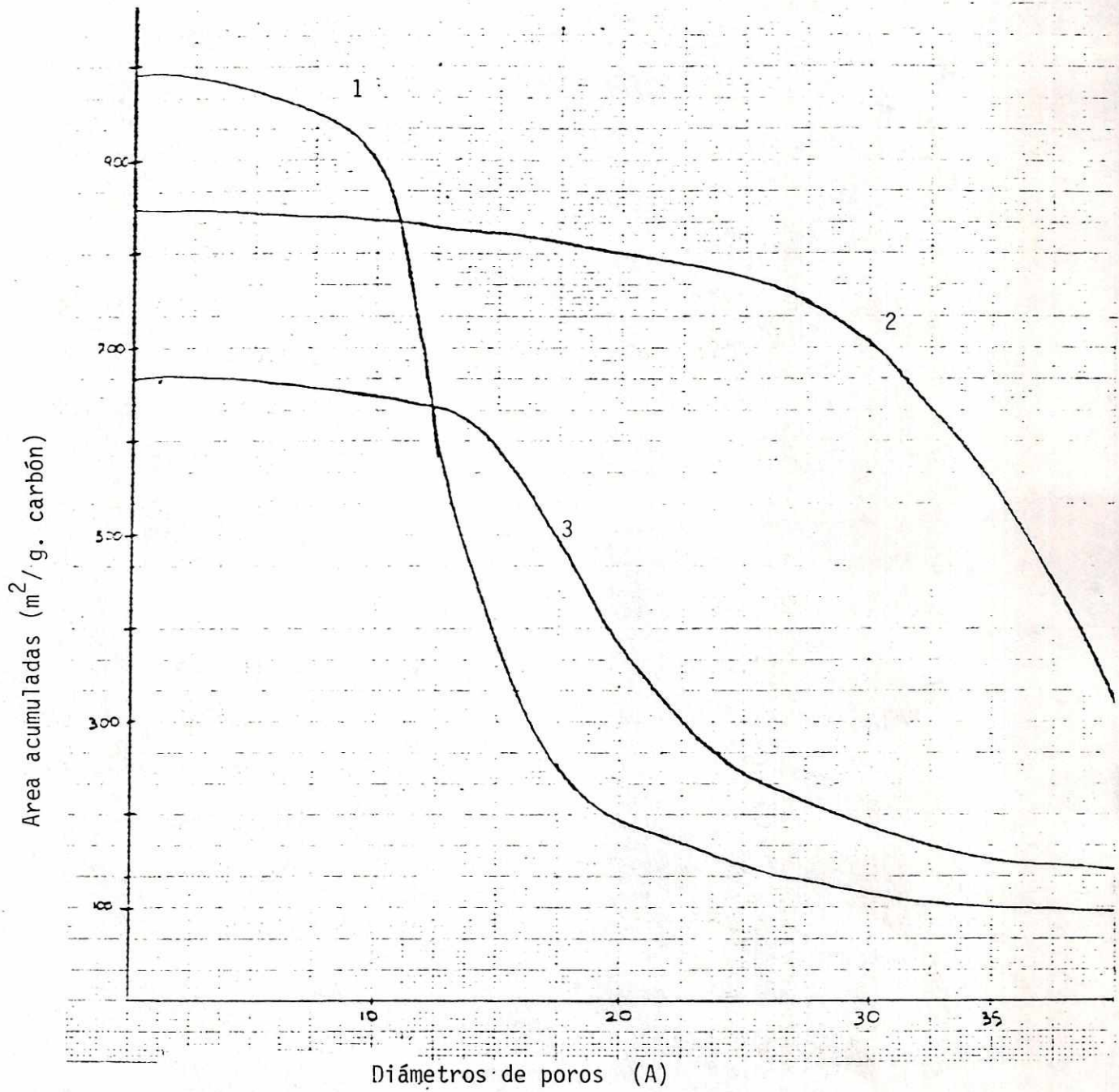


Figura 2. Fotografía electrónica de un carbón activado. Las partes oscuras representan el carbón y las partes claras representan los poros (6).

*carbon  
a fonte*

Gráfica 1 Area acumulada contra diámetros de poros para tres diferentes carbones (10).



peratura más adecuada depende de la viscosidad de la solución, de su estabilidad térmica y de la facilidad de cambio de temperatura del sistema. El pH ideal es específico de cada sistema (14). La importancia del tiempo de contacto del carbón en el sistema radica en el hecho de que la adsorción se realiza en dos etapas: 1. La transferencia del adsorbato de la fase líquida a la superficie del adsorbente y 2. La migración del adsorbato de la superficie del adsorbente a los sitios de adsorción dentro del mismo. Experimentos de cinética (11) demuestran que la segunda etapa es mucho más rápida que la primera.

A partir de medidas hechas a una temperatura constante se puede graficar  $N$ , el número de gramos de soluto adsorbidos por gramo de carbón, contra  $C$ , la concentración del soluto en la solución cuando se encuentran en equilibrio. A esta gráfica se le llama isoterma de adsorción. En sistemas muy simples, en los que solo una capa puede ser adsorbida por la superficie, se puede aplicar la isoterma derivada por Langmuir. La isoterma se basa en el postulado que dice que cualquier sitio de adsorción es equivalente y la habilidad de una molécula de adsorbato a enlazarse a la superficie del adsorbente no depende de si los sitios vecinos están ocupados o no (9). La isoterma de Langmuir se aplica comunmente a la adsorción de gases. La forma apropiada para la adsorción a partir de una solución es la siguiente:

$$\theta = \frac{K C}{1 + K C} \quad (1)$$

Donde  $\theta$  es la fracción de la superficie del sólido cubierta por las moléculas adsorbidas y  $K$  es una constante determinada. También

$$\theta = N/N_m \quad (2)$$

Donde  $N$  es el número de gramos adsorbidos por gramo de sólido adsorbente a una concentración  $C$  del soluto en equilibrio, Y  $N_m$  es el número de moles por gramo que se requieren para formar una sola capa. Igualando los valores de  $\theta$  en (1) y(2) se obtiene:

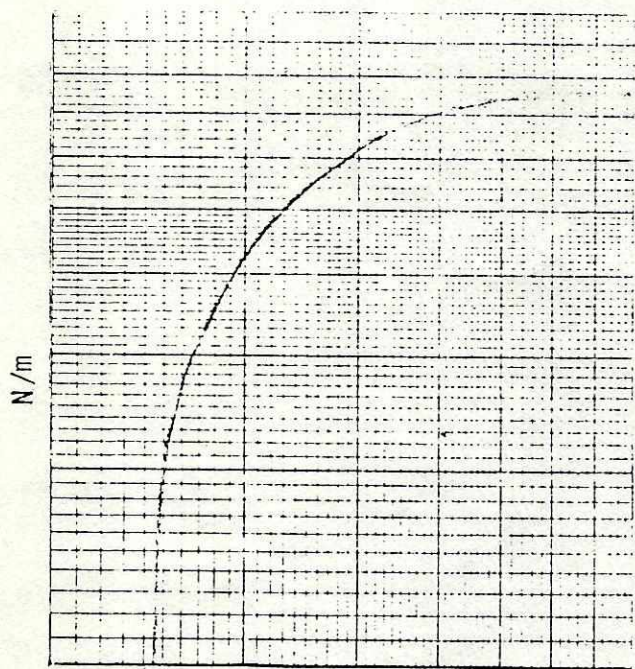
$$\theta = \frac{C}{N_m} + \frac{1}{KN_m} \quad (3)$$

La aplicación de la isoterma de Lagmuir tiene limitaciones que obligan al uso de otras como la isoterma empírica de Freundlich:

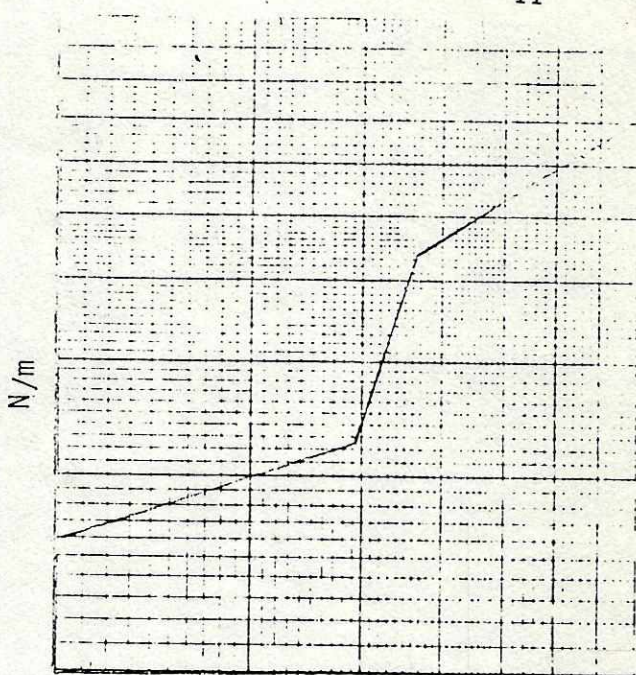
$$N = KC^{1/n} \quad (4)$$

Donde " $K$ " y " $1/n$ " son constantes que no tienen significado físico pero pueden ser evaluadas. Idealmente se obtiene una línea recta al graficar la ecuación de Freundlich en papel logarítmico, pero hay casos en los que la linealidad no se cumple por completo. En concentraciones bajas,  $N$  es directamente proporcional a  $C$ , y en concentraciones altas,  $N$  se acerca a un valor constante independiente de  $C$ . En la gráfica No. 2 se muestran tres casos de isotermas no lineales. Cuando hay impurezas no adsorbibles, se obtiene una gráfica como 2-a. El caso b muestra un cambio de pendiente que indica la presencia de dos sustancias adsorbidas a diferentes velocidades. La gráfica 2-c muestra el caso cuando el adsorbato ha cubierto completamente la superficie del adsorbente.

La isoterma de Freundlich provee información acerca de la forma de aplicación de los carbones así, entre más alta sea la pendiente de la línea, es más adecuado para ser usado en lechos, porque adsorbe más, cuando la concentración del adsorbato es mayor.

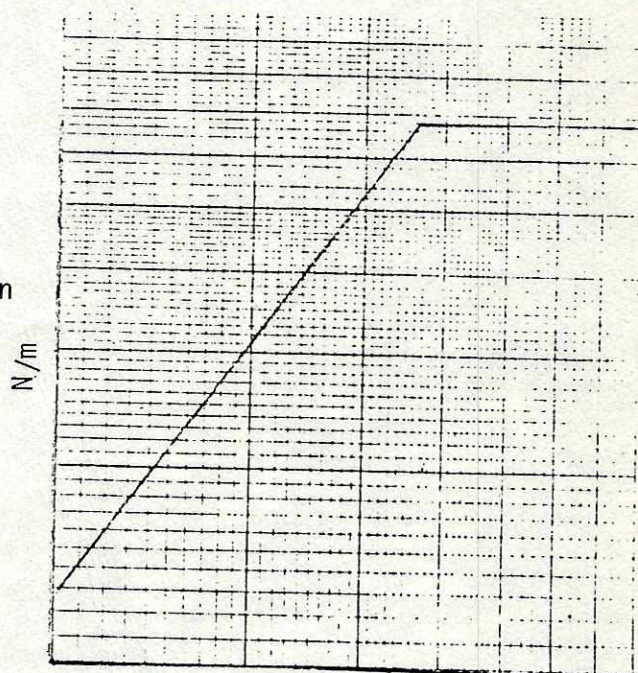


C  
2-a

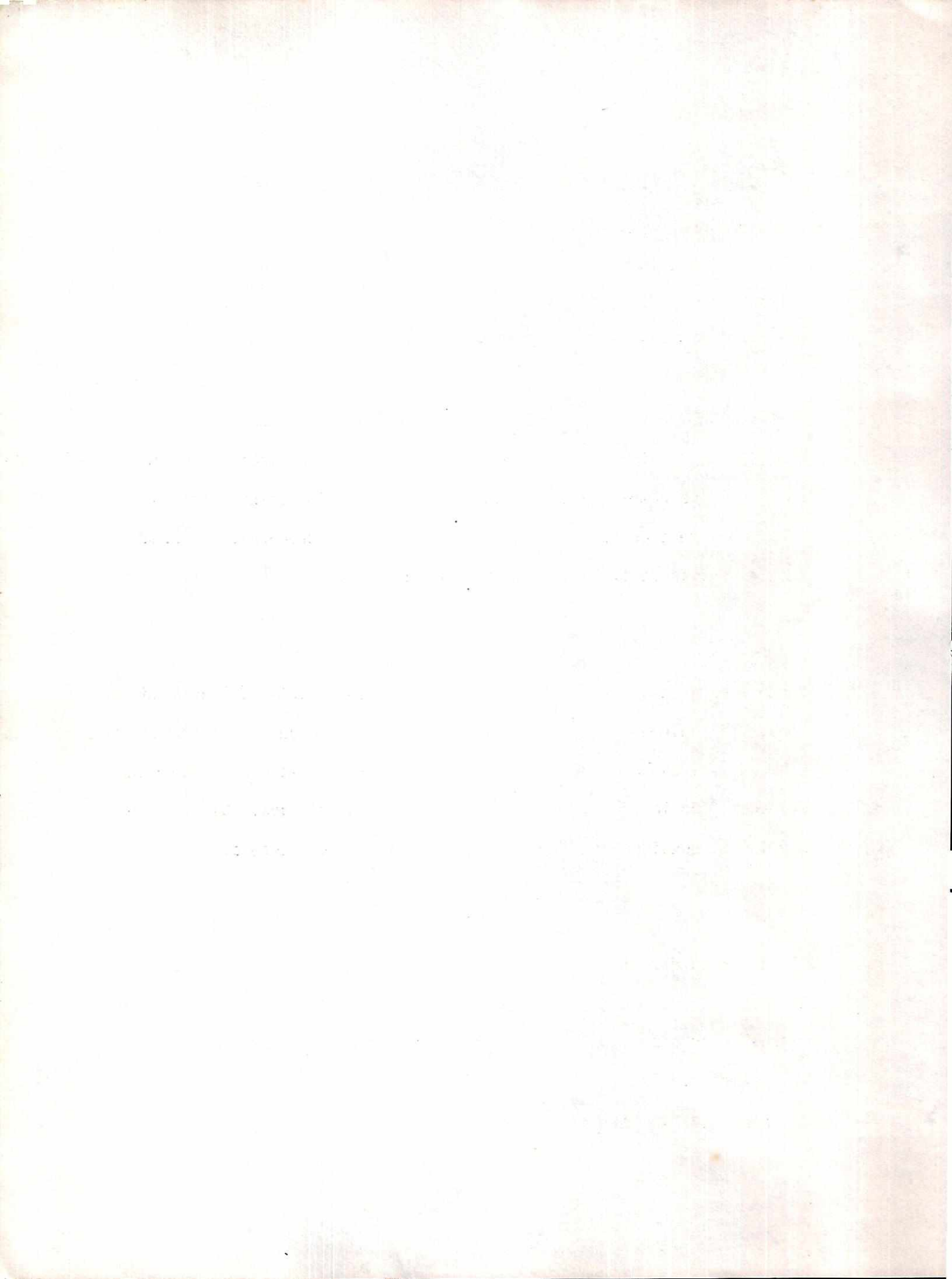


C  
2-b

Gráfica No. 2 Isotermas de adsorción  
no lineales (1).



C  
2-c



## II METODOS EMPLEADOS PARA MEDIR LOS DIAMETROS Y LAS AREAS DE LOS POROS

### 1. Diámetros de los microporos

El método más satisfactorio para caracterizar el tamaño de los microporos en el carbón activado es el descrito por Juhola & Wiig (15). El método usa la isoterma de desorción del agua la cual presenta el equilibrio involucrado en vaciar los poros. En esta forma, y mediante la ecuación de Kelvin, se puede evaluar cuantitativamente el tamaño de los poros. La ecuación de Kelvin se deriva de consideraciones termodinámicas, tomando en cuenta los cambios que ocurren en la energía libre, involucrados en el proceso de transferencia de un líquido a los microporos. La ecuación de Kelvin se expresa en la siguiente forma:

$$D = \frac{-4 V \sigma \cos w}{R T \ln (P/P_o)} \quad (5)$$

Donde D es el diámetro del poro,  $\sigma$  la tensión superficial del agua adsorbida, V el volumen molar del agua adsorbida, w el ángulo de contacto entre el agua y el carbón, R la constante de los gases, P la presión de vapor del agua y  $P_o$  la presión de vapor de saturación del agua. Si  $\sigma$ , V cos w, R y T son consideradas constantes, la ecuación se reduce a:

$$D = \frac{1}{K \ln (P/P_o)}$$

El recíproco del diámetro de los poros es proporcional al logaritmo natural de la presión de vapor relativa (P/P<sub>o</sub>). Los valores de los diámetros superiores a 1000 Å no pueden ser determinados por medio de esta ecuación.

### 2. Diámetros de los Macroporos

El diámetro de los macroporos puede ser medido usando el método descrito por Juhola & Wiig (16), en él se determina el volumen de mercurio que penetra dentro de los poros del carbón a diferentes presiones. Para evaluar el diámetro de estos poros se usa la ecuación de "subida capilar":

$$D = \frac{4\gamma \cos w}{p} \quad (6)$$

En la que  $w$  es el ángulo de contacto entre el carbón y el mercurio,  $\gamma$  la tensión superficial del mercurio, y  $p$  la presión a aplicar. De esta manera se pueden convertir las presiones a diámetros de poro.

### 3. Area de la superficie

El área de la superficie del carbón activado puede ser determinada por el método BET, el método Harkins-Jura y el método indirecto. En el método BET (Brunauer, Emmett y Teller) (18) se hacen medidas a diferentes valores de presiones y volúmenes del gas nitrógeno, adsorbido a temperaturas de  $-195^{\circ}\text{C}$ . La gráfica que se obtiene de los valores del volumen de nitrógeno adsorbido contra los de la presión a temperatura constante se conoce con el nombre de isoterma BET. Si el volumen de gas adsorbido se denota como  $V_m$ , la isoterma se puede describir por la ecuación:

$$\theta = \frac{V}{V_m} \quad (7)$$

La derivación original de la ecuación BET fue una extensión y generalización del tratamiento de Langmuir (8) para la adsorción de una capa de moléculas. Se basa en consideraciones cinéticas, en particular en el hecho que en equilibrio la velocidad de condensación de las molé-

culas del gas para formar cada capa adsorbida es igual a la velocidad con que se evaporan las moléculas de la capa. La derivación de la ecuación se lleva a cabo por medio de la mecánica estadística, basándose en consideraciones de equilibrio (8').

La ecuación BET es

$$\theta = \frac{n}{s} = \frac{c x}{(1-x)(1-x-cx)} \quad (8)$$

En la que  $s$  es el número de sitios,  $n$  el número de moléculas adsorbidas,  $x$  la presión relativa ( $P/P_0$ ),  $c$  una constante adimensional mayor que la unidad y dependiente sólo de la temperatura. Haciendo uso de la ecuación 7, la ecuación 8 se puede arreglar de la siguiente manera:

$$\frac{x}{V(1-x)} = \frac{1}{V_m c} - \frac{(c-1)x}{V_m c}$$

El volumen del gas adsorbido se relaciona con  $N$ , el número de moles adsorbidos, por medio de

$$PV_m = NRT_0 \quad (9)$$

siendo  $T_0 = 273.2 \text{ }^\circ\text{K}$  y  $R = 82.06 \text{ cm}^3 \text{ atmK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$   $P = 1 \text{ atm}$

El área total del sólido es

$$A = N_0 N \alpha \quad (10)$$

En la que  $N_0$  es el número de avogadro y  $\alpha$  el área de una molécula adsorbida.

El método Harkins-Jura (20) es una simplificación del anterior en lo que se refiere al tratamiento de los datos. Se obtiene la isoterma de adsorción del gas Nitrógeno a diferentes presiones,  $P$ . Se grafica  $\text{Log}(P/P_0)$  contra el recíproco del cuadrado del volumen adsorbido ( $1/v^2$ ).

El área del sólido está dada por la ecuación:

$$A = K_s s^{1/2} \quad (11)$$

en la que  $s$  es la pendiente de la isoterma y  $k$  una constante para el vapor adsorbido a una temperatura dada.

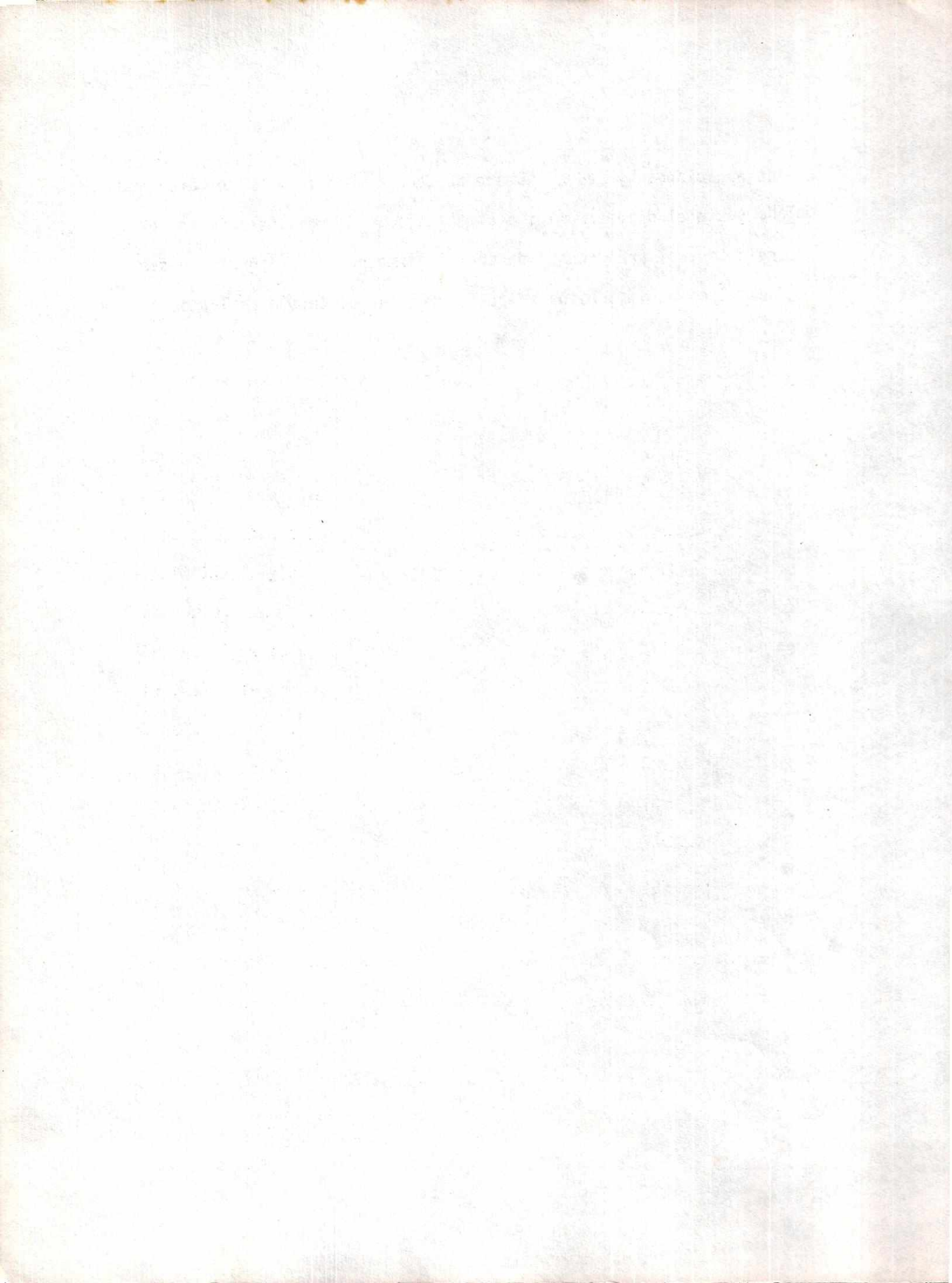
El área acumulada del carbón activado puede medirse indirectamente correlacionando la adsorción de ciertos adsorbatos con el área de los poros (21). Los adsorbatos comúnmente usados para caracterizar a un carbón son sustancias coloreadas y tintes, de ahí que las capacidades de adsorción de los carbones se expresan como números de iodo, azul de metileno y de melasas. Encontrada la capacidad de adsorción o número de una sustancia, es posible calcular el área acumulada hasta cierto diámetro de poro. Juhola (21) estableció el diámetro mínimo de poro en el que pueden penetrar ciertas sustancias y la ecuación que relaciona el número de adsorción de las siguientes sustancias con el área acumulada

Diámetros de poros en los que pueden penetrar ciertas sustancias y la ecuación que relaciona el número de adsorción de ellas con el área de superficie.

Cuadro No. 1

| Adsorbato               | Diámetro Mínimo de poro | Ecuación de la línea |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Yodo                    | 10 A°                   | $y = 17 + 1.07x$     |
| Permanganato de Potasio | 10 A°                   | $y = 4.8 + 0.50x$    |
| Azul de metileno        | 15 A°                   | $y = 0.4 + 0.34x$    |
| Eritrosina              | 19 A°                   | $y = 17 + .30x$      |
| Melasas                 | 28 A°                   | $y = 129 + x$        |

En las ecuaciones "y" es el número de cada adsorbato y "x" el área acumulada hasta el diámetro mínimo establecido. Si se construye una curva que relacione el área acumulada con el diámetro de los poros, se sabe con qué tipos de adsorbatos se puede utilizar el carbón activado.



### III APLICACIONES DEL CARBON ACTIVADO

Según sus aplicaciones, los carbones activados se dividen en dos clases:

1. Los que adsorben gases y vapores por medio de máscaras antigas, equipos de acondicionamiento de aire, y en sistemas para la recuperación de solventes vaporizados en procesos industriales. 2. Los que adsorben impurezas en fase líquida para la corrección o eliminación de las características indeseables tales como color, sabor, olor y espuma. Los carbones que pertenecen a la segunda clase se usan en el refinamiento de azúcares y jarabes para eliminar sustancias nitrogenadas y coloidales, lo que facilita la filtración del líquido y aumenta la velocidad de cristalización del producto sólido (22). También se utilizan en la purificación de aceites, grasas y ceras (1); en la remoción de impurezas contenidas en productos alimenticios como gelatinas, vinagres y jugos de frutas, así como bebidas alcohólicas, purificación del agua, productos farmacéuticos, aceites lubricantes y solventes para lavado en seco (23); como portadores en procesos catalíticos; en medicina interna y externa para la adsorción de toxinas, gases y venenos.

La característica que más diferencia a estas dos clases de carbón es el tamaño del poro. Los carbones que adsorben gases tienen alto volumen de microporos y bajo de macroporos. Los carbones que se usan en medios líquidos tienen un volumen de macroporos significativo que facilita que el líquido penetre la estructura de microporos (24). Esto permite que se llegue a un equilibrio más rápido y aumente la capacidad de adsorción para sustancias coloidales y de mayor tamaño molecular.

En general, los carbones que se utilizan en medios líquidos tienen la misma superficie que los que se usan para la adsorción de gases, pero ella está distribuida en poros de diferentes tamaños. En consecuencia, todos los carbones son igualmente efectivos para adsorber gases, vapores e impurezas en líquidos y soluciones; la efectividad depende de los diámetros de poro y la distribución del área superficial (27).

Los carbones activados se encuentran en dos formas comerciales: en polvo y en gránulos. Los carbones en polvo se mezclan con los líquidos que se desean purificar, y luego se quitan por filtración o decantación de los mismos. Los carbones granulados se cargan en columnas por las que se hacen pasar los líquidos (28,29 , 30, '31' ). En Guatemala el carbón activado tiene demanda a nivel industrial. El consumo anual total aproximado de carbón activado en polvo es de 140 toneladas métricas, distribuidas en la siguiente forma: 63 toneladas, utilizadas en la purificación del azúcar que usan las industrias de bebidas carbonatadas y confiterías; 30 toneladas, que usa la industria de aceites para eliminar la coloración roja que le imparten sustancias como los carotenoides; 40 toneladas, que emplea la industria licorera para la eliminación del color caramelo que normalmente adquiere el licor en las barricas. También se utilizan alrededor de 5 toneladas métricas anuales de carbón activado en polvo en la desodorización y decoloración de glicerina (32).

El consumo anual aproximado de carbón activado granulado es de 14 toneladas métricas que se usan en la dechlorinación del agua empleada para fabricar bebidas carbonatadas, así como en la confección de filtros para la purificación de agua (32).

#### IV FUENTES USUALES DE MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCION DEL CARBON ACTIVADO

Los carbones se obtienen a partir de sustancias orgánicas, principalmente de origen vegetal y consistencia leñosa. Al principio se creyó que cualquier material de origen orgánico podría ser transformado en carbón activado; sin embargo, sólo se ha reportado el uso de algas, bagazo, carbón mineral, cáscaras de coco, huesos, lignina, maderas, melasas, residuos de carne y sangre, cáscaras de nueces y otros (25). La naturaleza de la materia prima influye grandemente en las propiedades físicas del carbón producido (1, 5). Así, un aspecto importante es la cantidad de cenizas que provee la calcinación del material. A continuación se presenta el contenido típico de cenizas de algunos materiales usados comunmente en la producción de carbón activado.

Cuadro No. 1.

| MUESTRA               | % CENIZAS   |
|-----------------------|-------------|
| Cascabillo de trigo   | 16.1 a 16.7 |
| Cascabillo de arroz   | 24.0 a 24.5 |
| Cascabillo de café    | 14.0 a 14.5 |
| Bagazo de té de limón | 7.28 a 7.60 |
| Hueso de durazno      | 0.44 a 0.46 |
| Borra de algodón      | 2.80 a 3.00 |
| Madera de pino        | 0.34 a 0.38 |

#### Efecto de la activación sobre el material original

La carbonización de sustancias tales como la madera, el bagazo y la cáscara de ciertas semillas, aumenta apreciablemente su superficie específica debido a la degradación de las estructuras orgánicas y a la

eliminación de los compuestos volátiles que se forman. Al exponer el material carbonizado a la acción del vapor de agua o el dióxido de carbono, a altas temperaturas, aumenta grandemente la superficie interna y el número y dimensión de los poros. Igual ocurre cuando se carboniza el material en presencia de agentes químicos. A estos procesos se les conoce con el nombre de activación. La activación es consecuencia del aumento de los microporos disponibles a la adsorción por eliminación del material que se separa durante la carbonización (4).

En el proceso de carbonización, gran parte de los elementos, con excepción de una mayor cantidad de carbono y una menor de hidrógeno y oxígeno, son eliminados en forma gaseosa por descomposición pirolítica del material original. Los átomos libres de carbono elemental se reagrupan para formar los cristalitos mencionados al principio en relación a la estructura del carbón activado. El arreglo de los cristalitos es irregular y quedan espacios entre ellos que se llenan parcial o totalmente con carbono amorfo, producto de la descomposición de sustancias resinosas. El tamaño de los cristalitos está relacionado con la temperatura de carbonización (1) y, hasta cierto punto, con la composición y estructura de la materia prima. Durante la pirólisis, las sustancias orgánicas originales se separan y descomponen en otras que se reagrupan para formar estructuras aromáticas termoestables. También es posible que se formen núcleos que inicien la transformación en la que el patrón hexagonal crece gradualmente a expensas de la sustancia original. La transformación es casi completa pero quedan cadenas de hidrocarburos y anillos que se unen por enlaces covalentes a los

átomos que rodean a los cristalitos. Las diferencias en el tamaño, forma y arreglo de los cristalitos afectan la capacidad de adsorción y otras propiedades del carbón (4 ).

Se conocen dos clases de activación del carbón: química y física. Esta clasificación es arbitraria y no expresa la naturaleza de los procesos; sin embargo, son términos establecidos.

#### Activación Física

En esta clase de activación, el material carbonoso inactivo reacciona con sustancias gaseosas. Los gases oxidantes erosionan la superficie para incrementar el área (1). Los agentes activantes mayormente empleados son vapor de agua, dióxido de carbono y oxígeno pero también se utilizan los vapores de cloro, azufre, amonio y otras sustancias. Durante la etapa de activación se descomponen los núcleos de carbono no organizado y los cristalitos no uniformes, dando lugar a la formación de nuevos poros. En las etapas siguientes se hace significativo el aumento del tamaño de los poros, dando como resultado un aumento en el volumen de los macroporos (4 ).

Los átomos de carbono que forman la estructura del producto intermedio se diferencian unos de otros en su afinidad por el agente activante. Son más reactivos los que bordean a los cristalitos elementales porque sus valencias no están completamente equilibradas por interacción de los carbonos vecinos. A estos se les conoce como sitios activos, porque es aquí donde ocurre la reacción con el agente activante. Algunos autores sostienen la existencia de diferentes clases de sitios activos que tienen distinta reactividad (1 ). En la

reacción del carbono con agentes activantes gaseosos se forman complejos en la superficie de los sitios activos. Al descomponerse, se elimina el carbón oxidado de la superficie en forma de óxidos gaseosos y se obtienen nuevos átomos de carbono con cargas que no están completamente saturadas. Estos se localizan en los sitios activos de la superficie de los cristalitos y están preparados para reaccionar con otras moléculas del agente activante (23).

#### Activación Química

Las propiedades específicas que adquiere el carbón en la activación está determinadas en gran medida por la presencia de sales minerales durante la carbonización. En este proceso, las sales minerales ayudan a formar un esqueleto en el que se depositan los cristalitos debido a las fuerzas internas que se generan. Cuando las sales son disueltas y eliminadas por la acción de ácidos o el agua, entonces queda libre la superficie del carbón para unirse con otras sustancias (4 ). Parece ser que el agente químico influye en el proceso y restringe al mínimo la formación de resinas, con lo que el rendimiento aumenta y disminuya la temperatura necesaria para la pirólisis. Cada agente químico, sales minerales u otras sustancias ejerce una influencia específica en las estructuras moleculares que se forman en la superficie. La materia prima más utilizada en la producción de carbón activado consiste básicamente en celulosa. La acción electro-lítica del agente activante causa un rompimiento en la misma. Simultánea y posteriormente ocurren reacciones de oxidación en las que las sustancias inorgánicas solubles se unen al carbón y ya no pueden ser extraídas. En este proceso, algunos elementos como el potasio pueden

penetrar los platos hexagonales de los cristalitos y los dilatan, dejando así expuestas superficies que de otra forma no lo estarían. Una de las reacciones químicas más importantes en la pirólisis es la deshidratación por acción del calor y el agente activante, la formación de otras más simples, y el agua. Cuando la deshidratación se lleva a cabo con el agente químico, disminuye la formación del alquitrán.

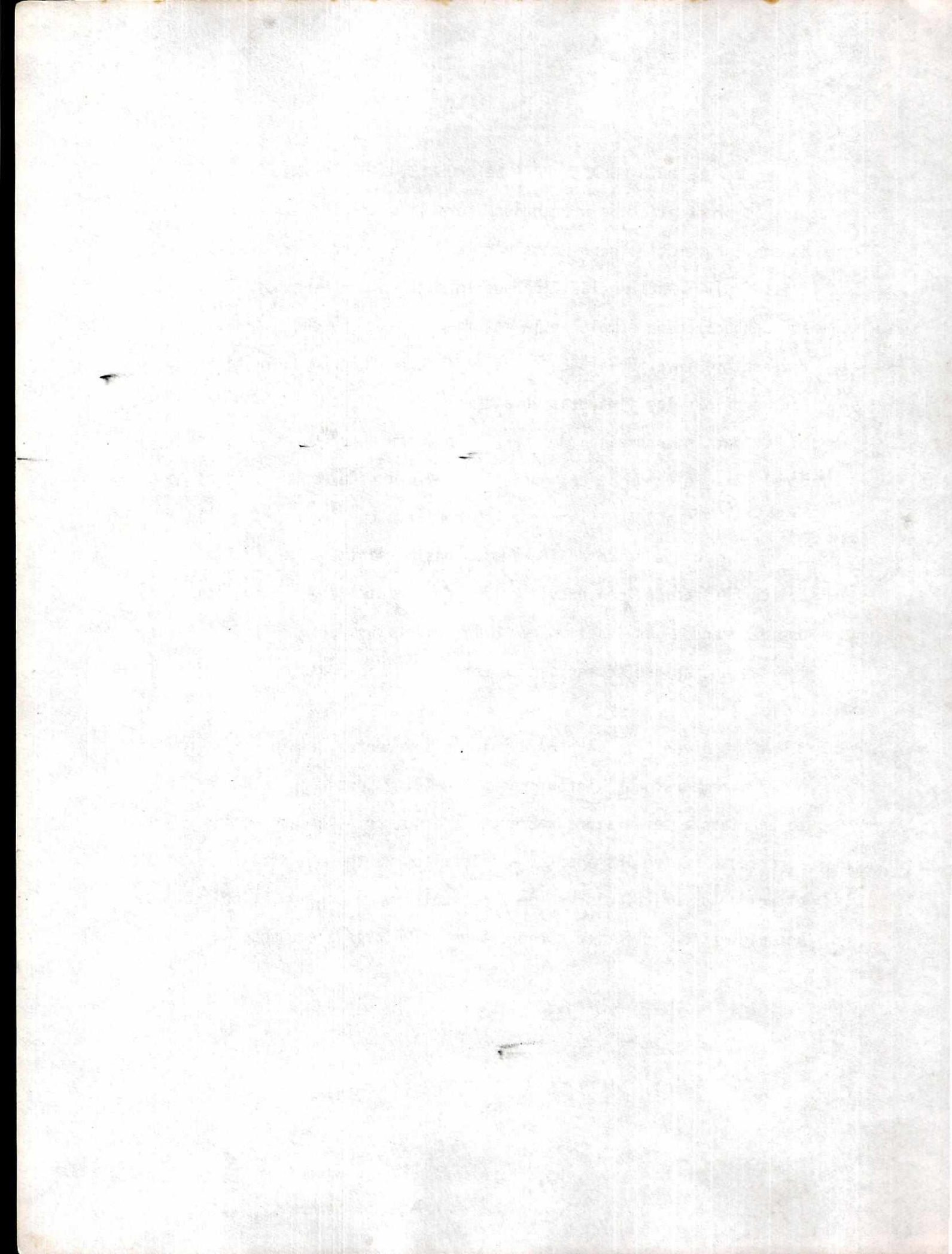
El activante químico que más se usa es el cloruro de zinc, pero también se emplea sulfuro de potasio, tiocianato de potasio, ácido sulfúrico, ácido fosfórico, hidróxidos de metales alcalinos y cloruros de calcio y magnesio. La activación ocurre a temperaturas entre 400 y 1000 ° C, dependiendo del método empleado.



## V. METODOS USUALES PARA LA PRODUCCION DE CARBON ACTIVADO

Los procedimientos presentados para la obtención del carbón activado son innumerables pero pocos han tenido éxito en su aplicación industrial (31). Estos se clasifican de la siguiente manera:

- a. Carbonización simple de la materia prima en ausencia de aire a una temperatura inferior a 600, °C, seguida de un aumento de la temperatura para expulsar las impurezas volátiles ( 1 ).
- b. Oxidación controlada del carbón con diferentes gases activantes como el aire, dióxido de carbono, cloro, dióxido de azufre y vapor de agua. El gas, a 900 a 1000 °C, se pone en contacto con la materia prima durante un tiempo que va desde 30 minutos hasta veinticuatro horas.
- c. Carbonización, con previa mezcla de la materia prima con compuestos que desprenden gases activantes a la temperatura de pirólisis. Entre las sustancias que se agregan se encuentran bicarbonatos, dolomitas y sulfatos ( 4 ).
- d. Carbonización, con previa adición de agentes químicos a la materia prima a temperaturas inferiores a 800 °C, y posterior lavado del producto enfriado a temperatura ambiente para quitar el exceso de los reactivos agregados. Entre los agentes químicos activantes más utilizados están el ácido fosfórico, cloruro de zinc, sulfuro de potasio, tiocianato de potasio, ácido sulfúrico e hidróxidos de metales alcalinos.



BIBLIOTECA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

VI OBJETIVOS

Objetivo general

Producir carbón activado por el método del cloruro de zinc, a partir de la cáscara de la semilla del hule, Hevea Brasiliensis, como materia prima.

Objetivos Específicos

1. Investigar el consumo de carbón activado en Guatemala, las industrias que lo usan y el posible aumento de la demanda por este producto.
2. Adaptar el método de activación con cloruro de zinc de acuerdo con la naturaleza de la materia prima y las condiciones del medio.
3. Experimentar las variables del proceso, a nivel de laboratorio, para elegir las que pueden ser aplicadas con mejores resultados en un diseño de producción mas efectivo.
4. Evaluar la eficiencia del producto obtenido y comparar sus propiedades con las de los carbones comerciales utilizados por las industrias nacionales.



## VII. JUSTIFICACION

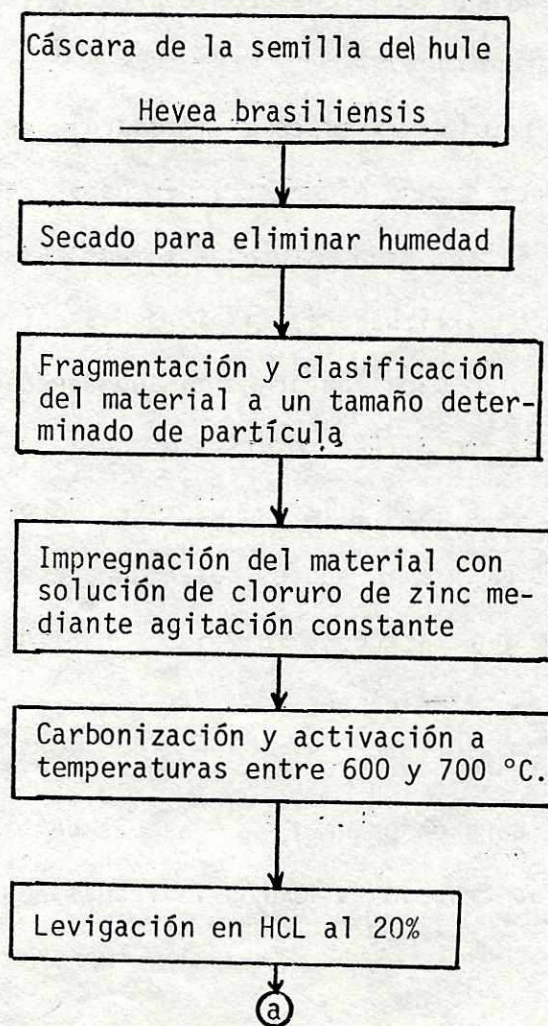
En Guatemala se cultiva el árbol del hule, Hevea brasiliensis, planta de la que se extrae el latex para la industria del hule. Esta planta produce periódicamente (anual o bianual) una gran cantidad de semilla rica en aceite el que hasta el año de 1983 empezó a usarse en la elaboración de resinas alquídicas, y harina en la producción de concentrados para la alimentación de ganado vacuno. En 1980 habían en el país aproximadamente 2.7 millones de plantas distribuidas en 150 fincas, con una producción de 2000 a 2500 semillas frescas por planta y temporada, equivalente a 21,600 toneladas métricas. Como el peso promedio de la semilla es de cuatro gramos y la cáscara constituye un 50% de ese valor, la industria que procesa el aceite y la harina en la cantidad mencionada, dispone de 10,800 toneladas métricas de cáscara que puede emplearse como combustible o en la producción de carbón activado (33).

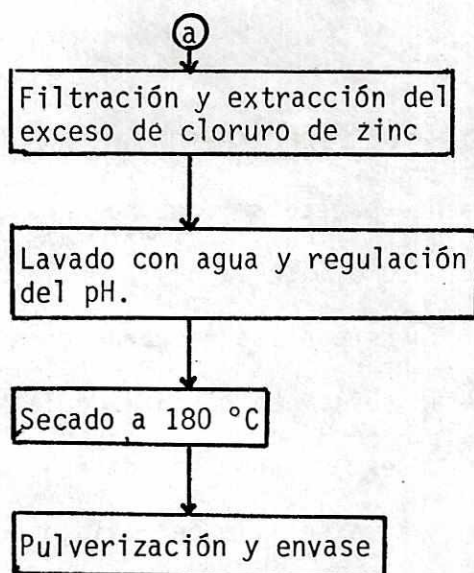
Por otra parte, las industrias nacionales que elaboran azúcares, licores, aceites, glicerina, bebidas carbonatadas, medicamento y otros, utilizan carbón activado para el refinamiento de sus productos. Una estimación de las importaciones sobrepasa las 150 toneladas métricas anuales que representan en divisas aproximadamente US \$ 75,000.00 (32). Lo anterior, asociado al hecho que la cáscara de la semilla del árbol del hule constituye un buen material para la producción de carbón activado, y que no existe industria de esta naturaleza en el país, se justifica pensar y trabajar en el desarrollo de las pruebas de laboratorio relacionadas con la impregnación, activación, lavado, neutrali-

zación, secado, dimensiones granulométricas, determinación de constantes fisicoquímicas y pruebas de adsorción de impurezas en diversos productos industriales.

### VIII. METODOLOGIA

Hasta el momento parece ser que no ha sido utilizada la cáscara de la semilla del hule como materia prima en la elaboración del carbón activado, tal como ocurre con las cáscaras de nueces y otros materiales leñosos como maderas (34). La cáscara de la semilla del hule es parecida a estos materiales en aspecto y dureza. Para producir carbón activado de la cáscara de la semilla del hule, poder evaluar sus propiedades y comprobar la efectividad de su capacidad adsortiva, se adaptó un método que usa serrín de madera como materia prima para hacer carbón activado, de acuerdo con el siguiente diagrama de flujo.





Los ensayos de laboratorio se hicieron de la siguiente manera:

1. En la primera prueba se usaron cuatro tamaños diferentes de partículas sin impregnación.

Se limpió la cáscara (mesocarpio de la semilla) para liberarla de impurezas como piedras, insectos y fragmentos de almendras, previo secado al sol y en estufa de temperatura constante. Luego se fragmentó en una licuadora, limpió de la cutícula adherida con aire a presión y tamizó para lograr un tamaño adecuado de partícula. La separación dió cuatro diferentes tamaños de la forma siguiente: la que pasa el tamiz de 5 mesh y la que es retenida por el de 10; la que pasa el tamiz de 10 mesh y la que es retenida por el de 20; la que pasa el tamiz de 20 mesh y la que es retenida por el de 30; la que pasa el tamiz de 30 mesh y es retenida por el de 40.

Se carbonizaron 100 gramos de cada una de las fracciones a 650 °C durante media hora en una mufla. Después de haber enfriado a temperatura ambiente las fracciones fueron levigadas en 600 ml de una solución

de ácido clorhídrico al 20% durante 48 horas. Los residuos solubles, producto de la carbonización, y el exceso de ácido clorhídrico, se eliminaron con agua destilada y en caliente. Posteriormente se ajustó el pH con solución de hidróxido de amonio al 10%, se secaron las muestras durante 24 horas a 120 °C, pesaron para determinar el rendimiento en porcentaje y envasaron en frascos de vidrio.

2. En una segunda prueba, sólo se utilizó el tamaño de partícula que pasa el tamiz de 30 mesh pero con impregnación del material como activante. El activante fue preparado disolviendo zinc metálico de calidad comercial con ácido clorhídrico al 37%. La solución se filtró en lana de vidrio para eliminar las impurezas no disueltas y evaporó hasta obtener una densidad de 1.8 g/ml. El pH de la solución era de uno.

La impregnación se hizo mezclando, con un agitador de varilla, 150 g de cáscara con 250 ml de solución activante. El proceso se repitió con tres muestras a las temperaturas de 4, 25 y 95 °C, durante el tiempo de una hora. En otras muestras, se fijó la temperatura a 25 °C y ensayaron los tiempos de 1, 2 y 3 horas. Como lo indica el diagrama de flujo, las muestras impregnadas fueron puestas en crisoles de porcelana cubiertos con su tapadera y calentados en una mufla a 650 °C durante media hora.

3. Posteriormente y en una tercera prueba, se carbonizaron cinco muestras de 150 gramos cada una, previamente impregnadas con 250 milímetros de la solución de cloruro de zinc a 94 °C y durante una hora. Tres de ellas a 650 °C, y la otra a 700 °C. Las muestras de 650 °C se carbonizaron durante media

Las muestras de 600 °C y 700 °C se carbonizaron durante media hora.

Todos los ensayos realizados en el laboratorio, con sus variantes como las descritas anteriormente, son parte del proceso que aparece en el diagrama de flujo, desde la materia prima hasta el producto final que fue envasado para los análisis y las pruebas de adsorción efectuadas con posterioridad.

Métodos usados en la evaluación de los carbones obtenidos

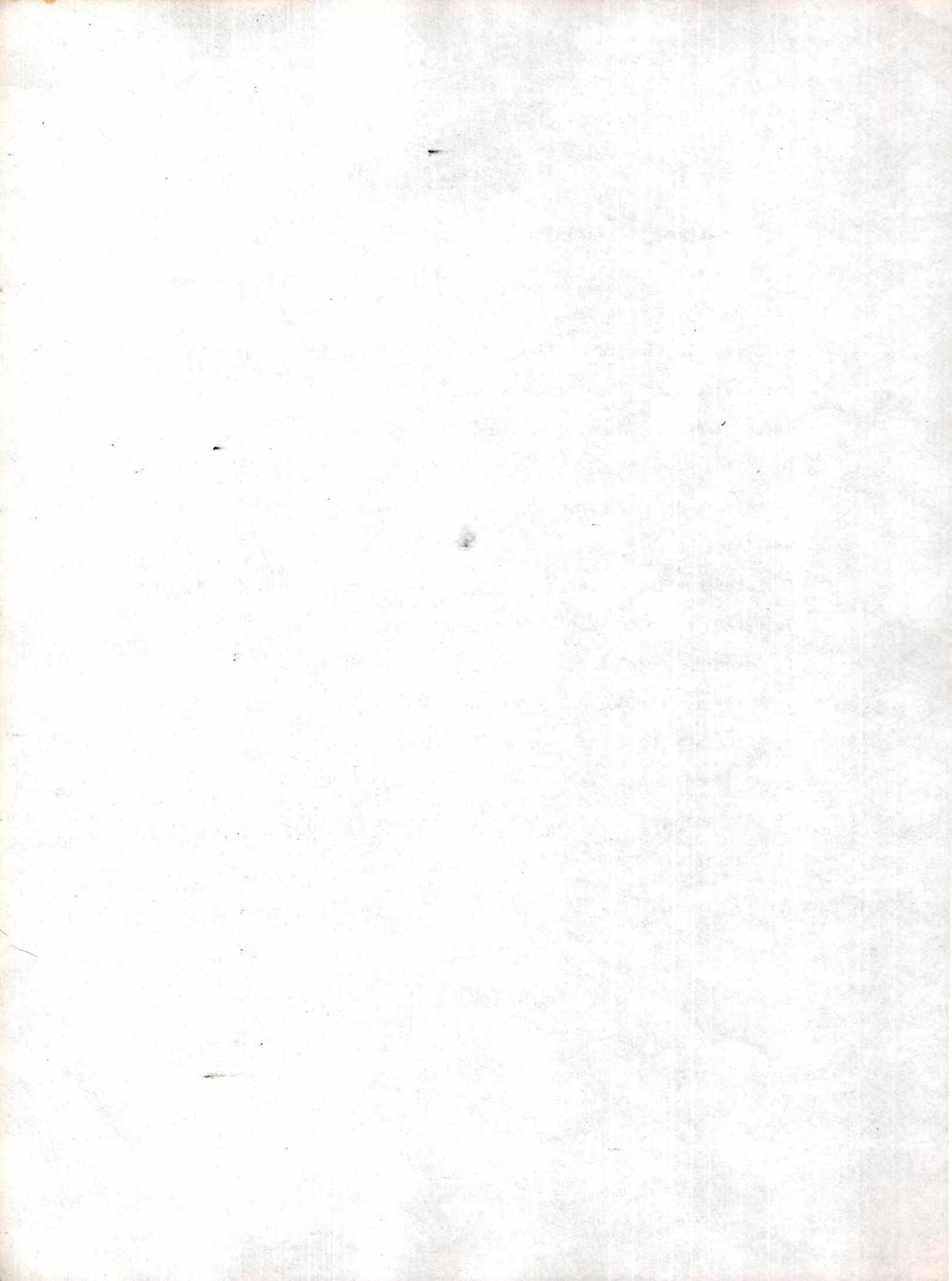
Se midió el pH por el método ASTM D-3838-80. La presencia del zinc soluble se comprobó mediante una solución de 0.2M de ferrocianuro de potasio, agregada al filtrado.

La presencia de cloruros fue detectada con una solución de nitrato de plata 1 M agregada al agua de lavado. El porcentaje de humedad fue determinado por el método ASTM D-2867-80; el contenido total de cenizas, por el método ASTM D-2868-80; la densidad aparente, por el método ASTM D-2854-80; la medida de la adsorción del azul de metileno, por el método ASTM D-2355-80, y la medida de la adsorción del yodo, por el método ASTM D-1580-80; para el tercer grupo de carbones se usó además el método ASTM D-2355-80 para medir la adsorción de la eritrosina.

## IX. MATERIALES

El material utilizado fue el siguiente:

1. Cáscara de semilla del hule, proveniente de almacenada y secada.
2. Acido clorhídrico al 37 %, yodo metálico, yoduro de potasio, tiosulfato de sodio, azul de metileno, hidróxido de amonio y eritrosina, todos grado analítico, y almidón, de grado industrial.
3. Molino Raymond No. 82 (T)
4. Balanza Ohaus Centrogram, Cap. max. 311g., div. 0.01 g.; balanza analítica Mettler H-80, cap. max. 160 g., div. 0.0001 g.
5. Estufa de temperatura constante Blue M. Stabil Therm Constant Temperature Cabinet Witch Power-o-Matic 70.
6. Desecadora con cloruro de calcio anhidro.
7. Mufla con control de temperatura Thermolyne 10500 Furnace
8. Licuadora Comercial Blendor Waring
9. Agitador de varilla Caframo Stirrer Type RZR1
10. Agitador Magnético Fisher Thermix Stirrer 120 M.
11. Centrífuga Damon/IEC Division



## X RESULTADOS

En este estudio se utilizó la cáscara de la semilla del árbol del hule, previamente preparada de acuerdo con el diagrama de flujo que aparece en la metodología. El porcentaje de humedad y de cenizas del material molido fue de  $5.20 \pm 0.01$  y  $0.38 \pm 0.03$  %, respectivamente.

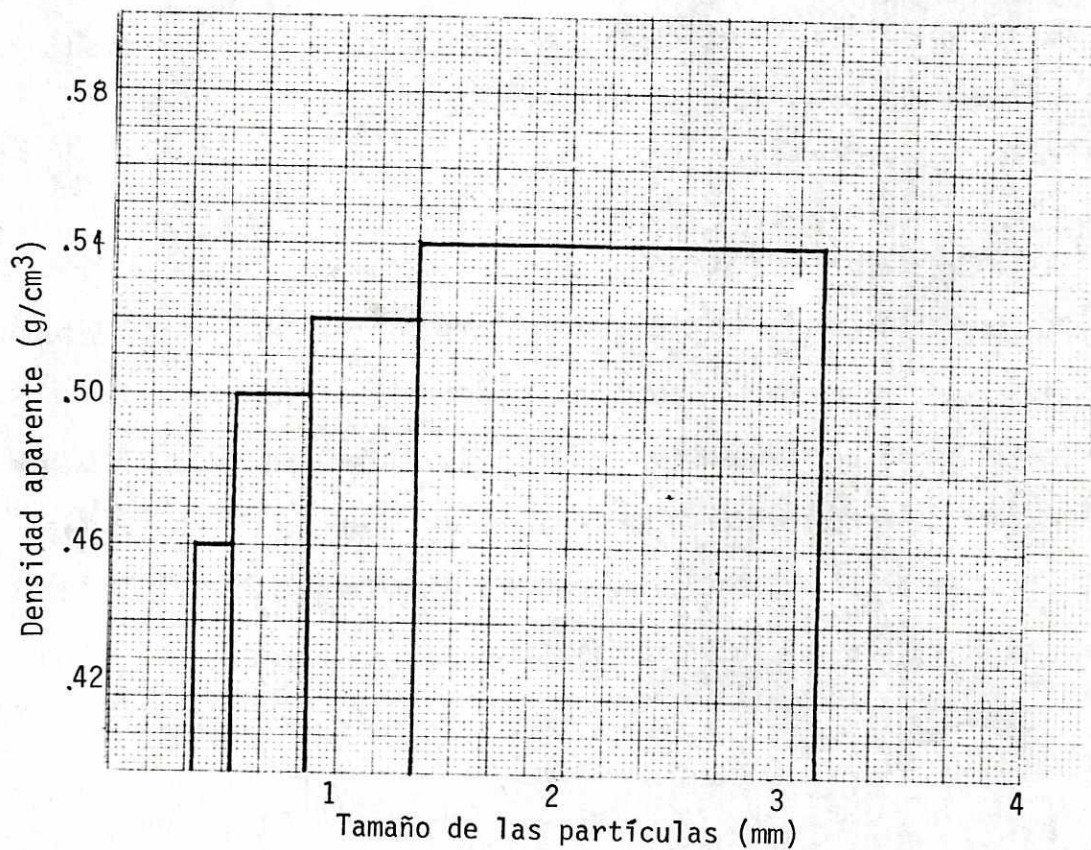
En la primera parte de los ensayos de laboratorio para obtener el carbón, se usaron cuatro diferentes tamaños de partículas. El cuadro No. 1 muestra los resultados de densidad aparente y porcentaje de humedad de los carbones obtenidos. Las gráficas Nos. 1 y 2 muestran la densidad aparente y el porcentaje de humedad en función del tamaño de las partículas, respectivamente. El cuadro No. 2 presenta los resultados del porcentaje de rendimiento, el contenido de cenizas y la medida del pH.

El porcentaje de rendimiento para el carbón obtenido a partir de las partículas retenidas por el tamiz de 10 mesh fue de 21.70 %, mientras que para el carbón obtenido a partir de las partículas retenidas por el tamiz de 40 mesh fue de 18.40 %. La gráfica No. 3 presenta el porcentaje de rendimiento en función del tamaño de las partículas. La variación en el porcentaje de cenizas encontrado para las cuatro muestras de carbón fue poco significativa.

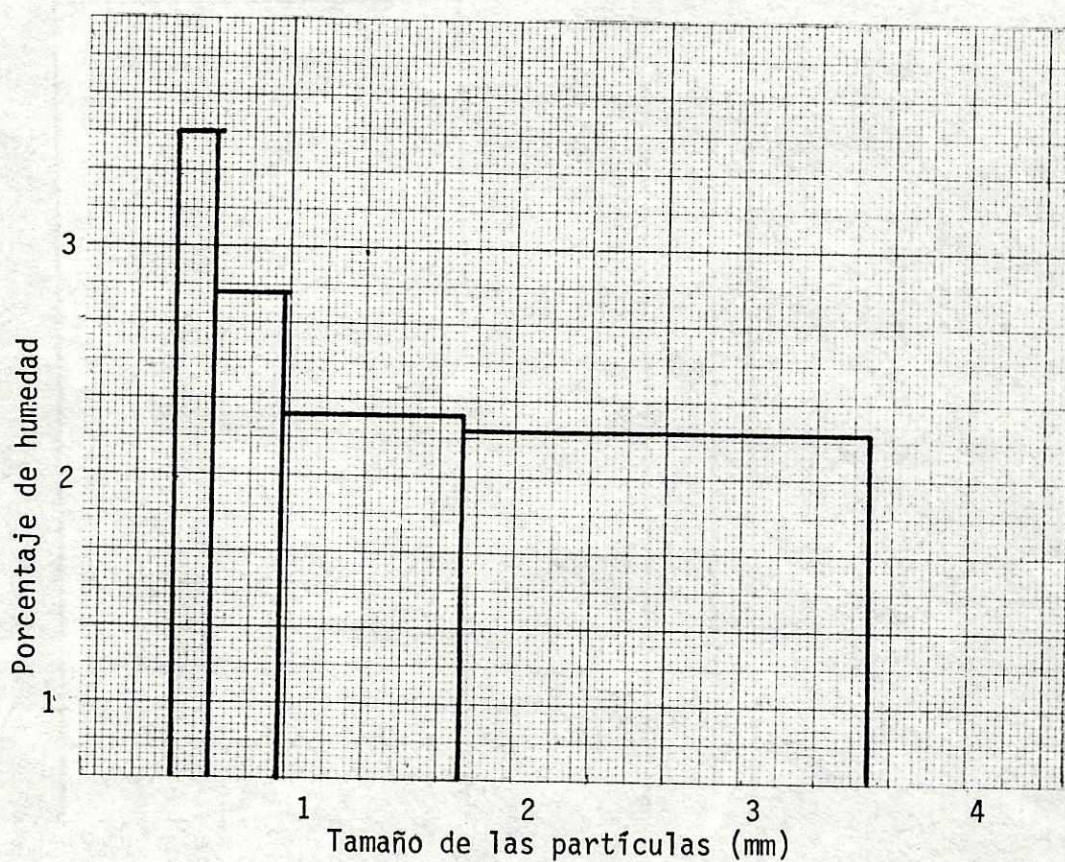
Cuadro No. 1 Tamaño de las partículas, densidad aparente y porcentaje de humedad para cuatro muestras de carbón.

| Carbón No. | Tamaño promedio de las partículas (mm). | Densidad Aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | Porcentaje de humedad |
|------------|---|--|-----------------------|
| 1          | $2.6 \pm 0.9$                           | $0.54 \pm 0.02$                              | $2.23 \pm 0.01$       |
| 2          | $1.3 \pm 0.4$                           | $0.52 \pm 0.02$                              | $2.26 \pm 0.01$       |
| 3          | $0.75 \pm 0.19$                         | $0.50 \pm 0.02$                              | $2.83 \pm 0.01$       |
| 4          | $0.47 \pm 0.09$                         | $0.46 \pm 0.02$                              | $3.52 \pm 0.01$       |

Gráfica No. 1 Densidad aparente en función del tamaño de las partículas usadas en la producción del carbón.



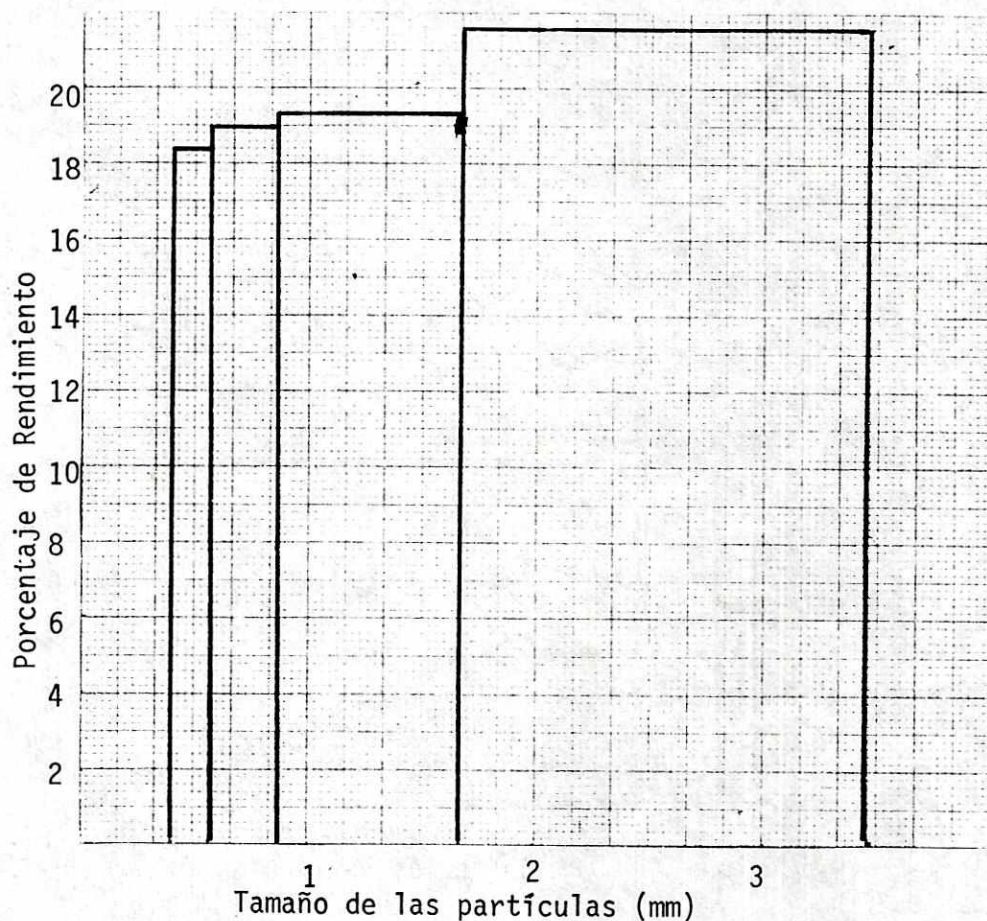
Gráfica No. 2 Porcentaje de humedad en función del tamaño de las partículas.



Cuadro No. 2 Porcentaje de rendimiento, porcentaje de cenizas y pH de cuatro muestras de carbón.

| Carbón No. | Porcentaje de rendimiento | Porcentaje de cenizas | pH <sub>22°C</sub> |
|------------|---------------------------|-----------------------|--------------------|
| 1          | 21.7 ± 0.1                | 0.37 ± 0.03           | 8.00 ± 0.05        |
| 2          | 19.3 ± 0.1                | 0.38 ± 0.03           | 8.02 ± 0.05        |
| 3          | 19.0 ± 0.1                | 0.36 ± 0.03           | 7.52 ± 0.05        |
| 4          | 18.4 ± 0.1                | 0.37 ± 0.03           | 7.85 ± 0.05        |

Gráfica No. 3 Porcentaje de rendimiento en función del tamaño de las partículas usadas como materia prima para carbón activado.



El cuadro No. 3 muestra los datos utilizados en la obtención del número de azul de metileno según el procedimiento señalado en el apéndice A. La gráfica No. 4 presenta las isotermas de adsorción del azul de metileno en las cuatro muestras de carbón. En el cuadro No. 4 se presentan las líneas de regresión calculadas aplicando la ecuación de Freundlich en su forma logarítmica, y utilizadas en la obtención del número de azul de metileno. Los resultados de dicho número y del número de yodo se encuentran en el cuadro No. 5. Las gráficas Nos. 5 y 6 muestran el número de azul de metileno y el número de yodo en función del tamaño de las partículas utilizadas como materia prima en la producción del carbón.

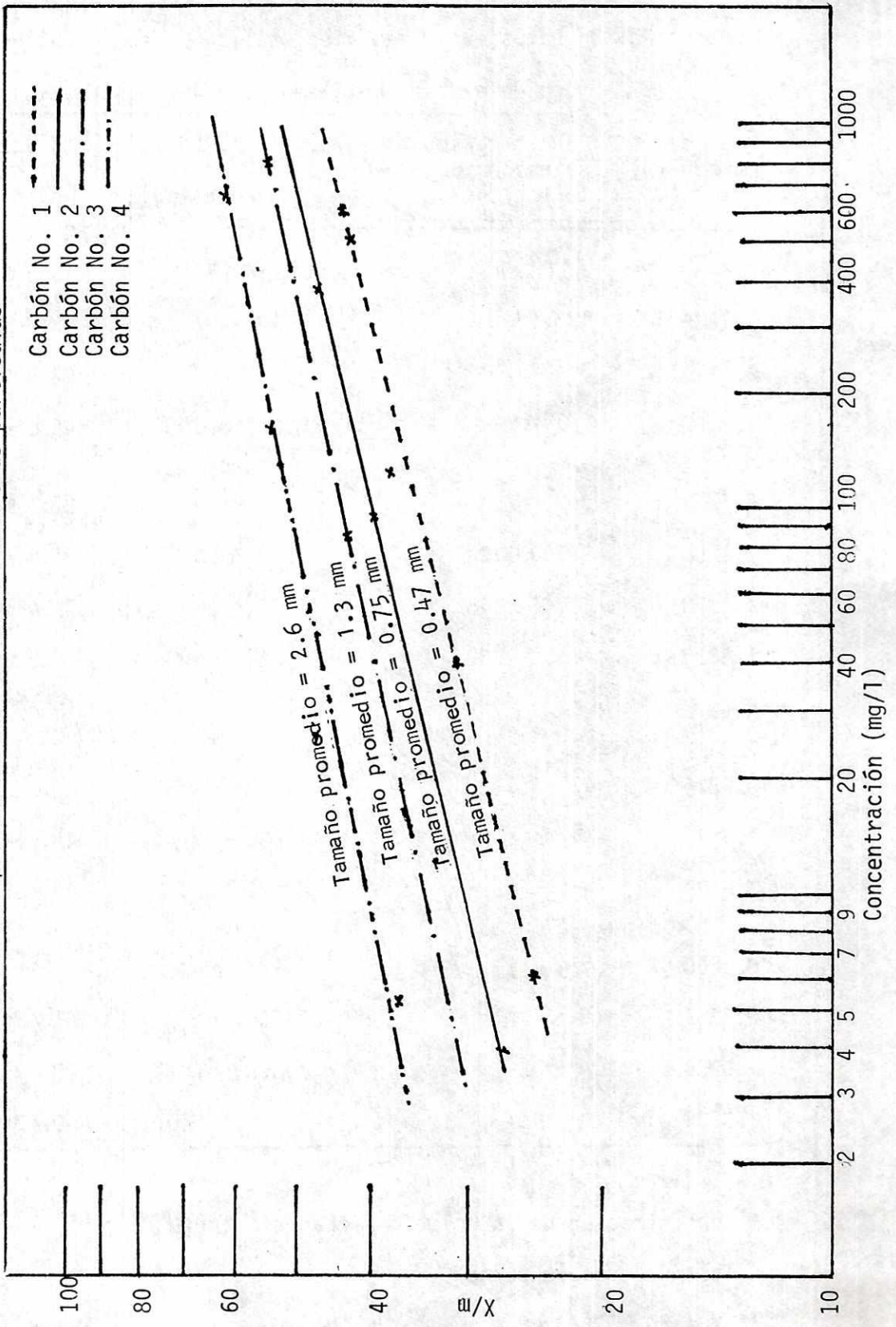
Cuadro No. 3 Datos experimentales utilizados en la obtención del número de azul de metileno para las muestras 1 a 4

| Masa de carbón (g)<br>$\pm 2 \times 10^{-4}$ | Concentración de solución remanente (mg/L) * | (C)(V**) consti-<br>tución de sol.<br>remanente (mg) % | X azul de me-<br>tileno adsor-<br>bido (mg) | X/M<br>(mg/g)  |
|--|--|--|---|----------------|
| 0.4460                                       | 603 $\pm$ 7                                  | 30.1 $\pm$ .4  | 19.8 $\pm$ .2                               | 44.51 $\pm$ .5 |
| 1.1685                                       | 123.6 $\pm$ 1.6                              | 6.18 $\pm$ .07   | 43.8 $\pm$ .6                               | 37.50 $\pm$ .4 |
| 1.5145                                       | 39.8 $\pm$ .5                                | 1.99 $\pm$ .02   | 48.8 $\pm$ .6                               | 31.70 $\pm$ .4 |
| 1.8072                                       | 6.15 $\pm$ .08                               | 0.301 $\pm$ .003                                       | 49.6 $\pm$ .6                               | 27.50 $\pm$ .4 |
| 0.5772                                       | 498 $\pm$ 6.2                                | 24.9 $\pm$ .3  | 25.1 $\pm$ .3                               | 43.50 $\pm$ .4 |
| 1.1268                                       | 96.3 $\pm$ 1.2                               | 4.82 $\pm$ .07   | 45.2 $\pm$ .4                               | 40.10 $\pm$ .4 |
| 1.4870                                       | 12.64 $\pm$ .15                              | 0.63 $\pm$ .007  | 49.4 $\pm$ .4                               | 33.20 $\pm$ .4 |
| 1.8239                                       | 4.15 $\pm$ .08                               | 0.210 $\pm$ .001                                       | 49.8 $\pm$ .4                               | 27.30 $\pm$ .4 |
| 0.1314                                       | 850 $\pm$ 10                                 | 42.5 $\pm$ .4  | 7.39 $\pm$ .08                              | 56.8 $\pm$ .4  |
| 0.9226                                       | 138 $\pm$ 1                                  | 6.91 $\pm$ .07   | 43.0 $\pm$ .4                               | 46.7 $\pm$ .4  |
| 1.3471                                       | 16.64 $\pm$ .15                              | 0.831 $\pm$ .007                                       | 49.1 $\pm$ .4                               | 36.50 $\pm$ .4 |
| 1.6335                                       | 3.551 $\pm$ .002                             | 0.177 $\pm$ .001                                       | 49.8 $\pm$ .4                               | 30.50 $\pm$ .4 |
| 0.2660                                       | 675 $\pm$ 7                                  | 33.7 $\pm$ .4  | 16.24 $\pm$ .15                             | 61.0 $\pm$ .4  |
| 0.7659                                       | 165.8 $\pm$ 1                                | 8.26 $\pm$ .08   | 41.7 $\pm$ .4                               | 54.5 $\pm$ .4  |
| 1.0209                                       | 26.2 $\pm$ .2                                | 1.30 $\pm$ .02   | 48.7 $\pm$ .4                               | 47.7 $\pm$ .4  |
| 1.3299                                       | 5.326 $\pm$ .08                              | 0.266 $\pm$ .001                                       | 49.7 $\pm$ .4                               | 37.4 $\pm$ .4  |

\* Concentración de la solución remanente luego de haber sido adsorbida por las muestras de carbón.

\*\* V = 50.00  $\pm$  0.08 ml.

Gráfica No. 4 Isotermas de adsorción del azul de metileno en cuatro muestras de carbón, producidas con diferente tamaño de partículas



Cuadro No. 4 Líneas de regresión \* calculadas a partir de los datos del cuadro No. 3 y utilizadas en la obtención del número de azul de metileno.

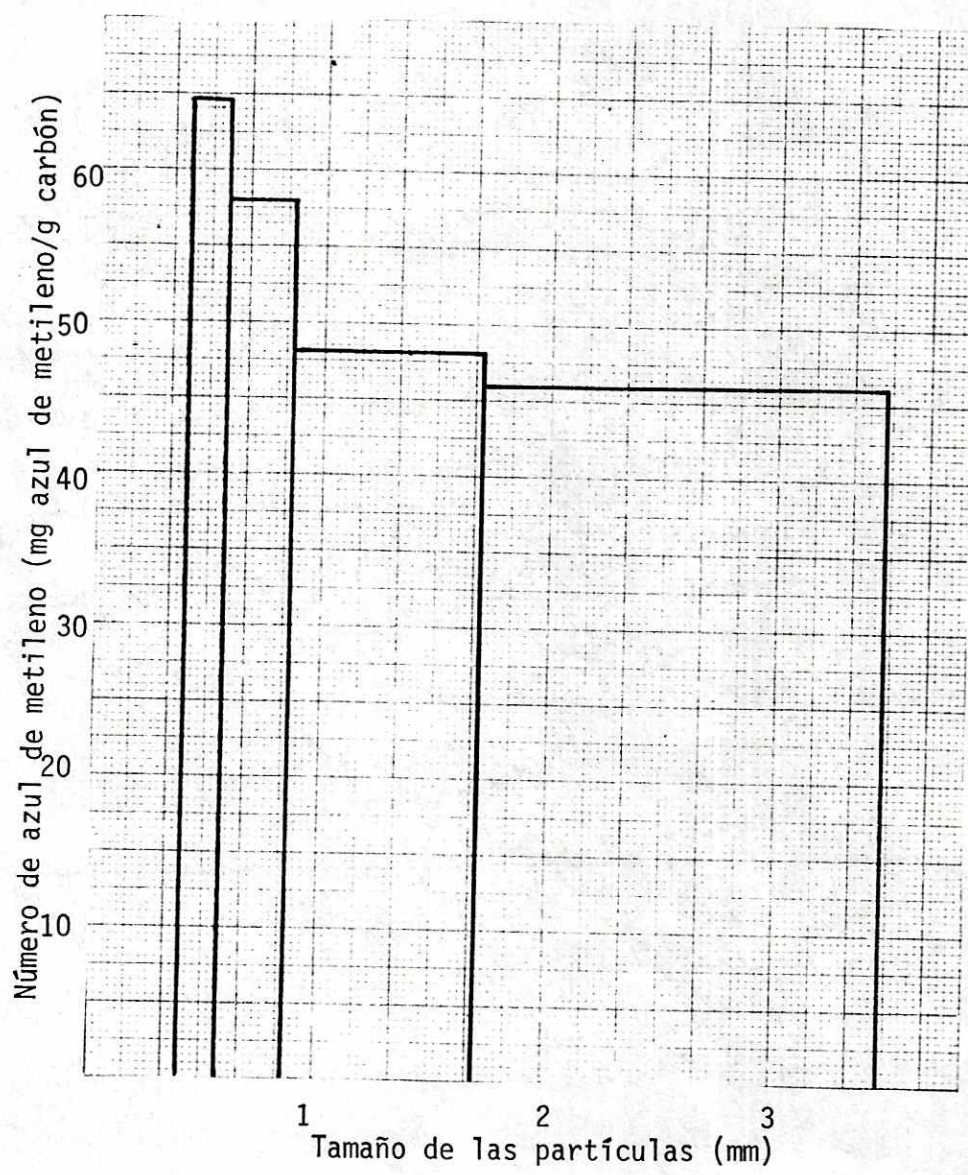
| Carbón No. | Log. K | 1/n  | r     |
|------------|--------|------|-------|
| 1          | 1.34   | 0.10 | 0.992 |
| 2          | 1.39   | 0.09 | 0.973 |
| 3          | 1.42   | 0.11 | 0.999 |
| 4          | 1.51   | 0.09 | 0.984 |

\*  $\text{Log} (x/m) = \text{Log. } k + 1/n \text{ Log. } C.$

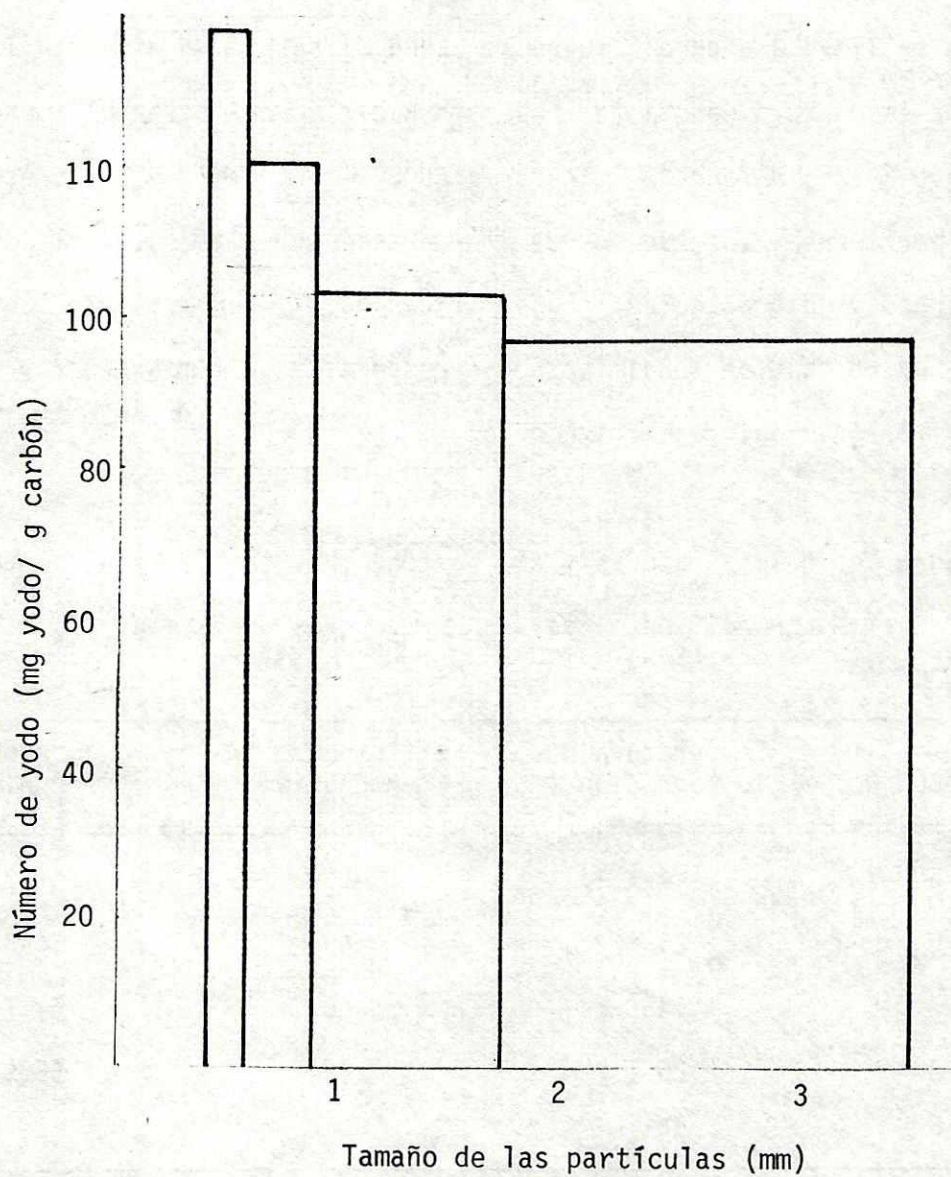
Cuadro No. 5 Número de azul de metileno y Número de yodo para cuatro muestras de carbón

| Carbón No. | número de azul de metileno (mg. A.de metileno/g.carbón) | Número de yodo (mg.Yodo/g.carbón) |
|------------|---|-----------------------------------|
| 1          | 46.5 ± 1.4  | 183±1                             |
| 2          | 48.1 ± 1.4  | 204±1                             |
| 3          | 58.0 ± 1.7  | 219±1                             |
| 4          | 64.7± ± 1.8   | 244±1                             |

Gráfica No. 5 Número de azul de metileno en función del tamaño de las partículas utilizadas como materia prima en la producción de carbón



Gráfica No. 6 Número de yodo contra tamaño de partícula usadas como materia prima en la producción del carbón.

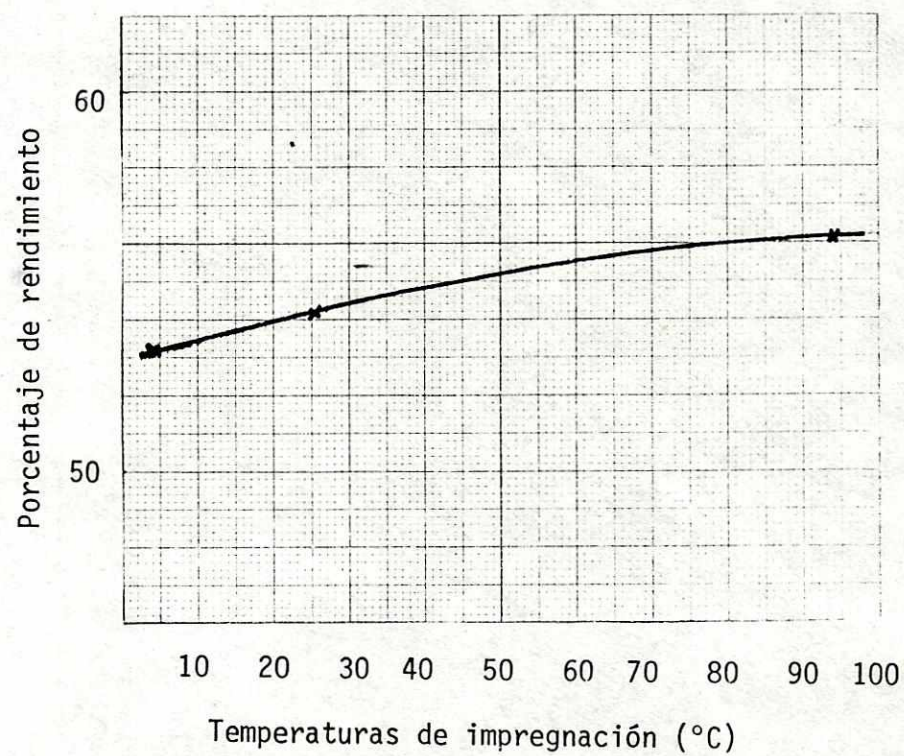


En la segunda parte de los ensayos de laboratorio se usó como materia prima el material que pasó el tamiz de 30 mesh, se varió la temperatura de impregnación, mientras se mantuvo constante el tiempo en el que se llevaba a cabo; luego se varió dicho tiempo mientras la temperatura se mantuvo constante. La carbonización del material impregnado se llevó a cabo durante 30 minutos a 650°C. El cuadro No. 6 presenta las temperaturas y los tiempos de impregnación utilizados, y el porcentaje de rendimiento obtenido. Las gráficas Nos. 7 y 8 muestran la variación del porcentaje de rendimiento con respecto a la temperatura y el tiempo de impregnación, respectivamente.

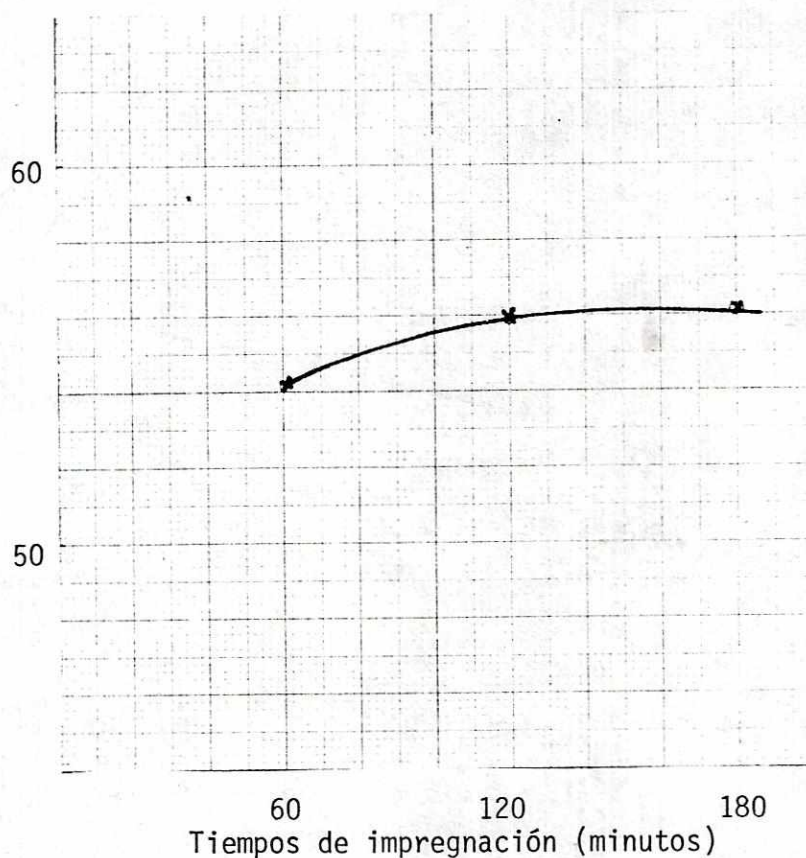
Cuadro No. 6 Temperaturas y tiempos de impregnación, y porcentajes de rendimiento de cinco muestras de carbón.

| Carbón No. | Temperatura de impregnación (°C) | Tiempo de impregnación (min) | Porcentaje de rendimiento |
|------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 5          | 4 ± 1                            | 60                           | 53.2 ± 0.1                |
| 6          | 25 ± 2                           | 60                           | 54.2 ± 0.1                |
| 7          | 94 ± 2                           | 60                           | 61.7 ± 0.1                |
| 8          | 25 ± 2                           | 120                          | 55.9 ± 0.1                |
| 9          | 25 ± 1                           | 180                          | 56.1 ± 0.1                |

Gráfica No. 7 Porcentajes de rendimiento en función de las temperaturas de impregnación.



Gráfica No. 8 Porcentajes de rendimiento en función de los tiempos de impregnación.

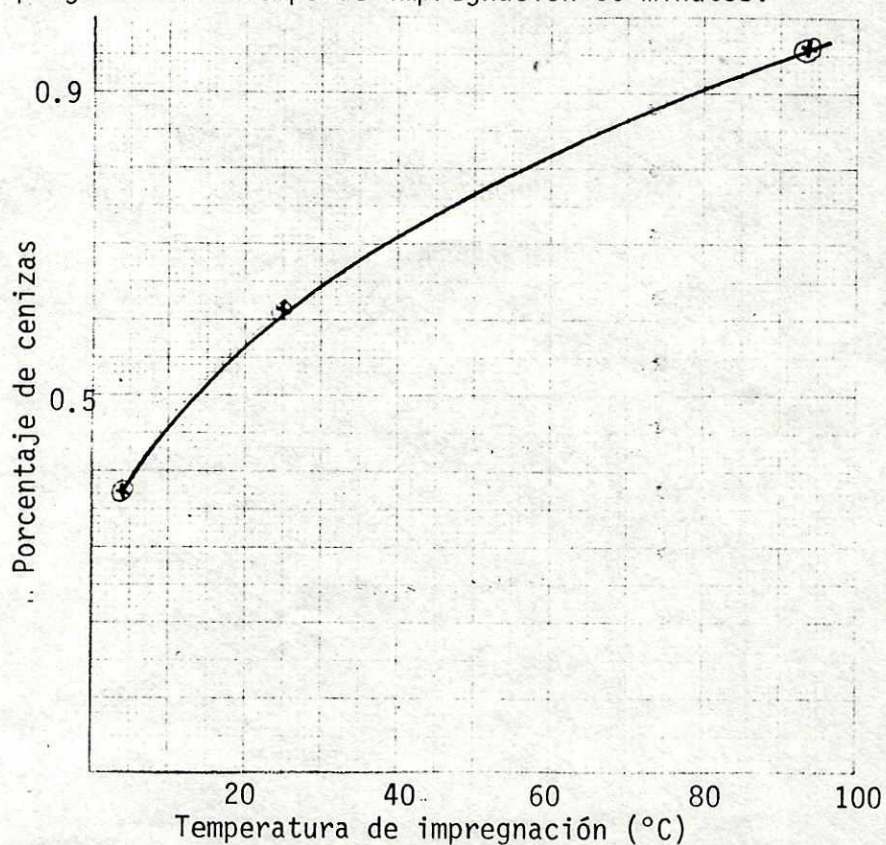


El cuadro No. 7 muestra la densidad aparente, el porcentaje de humedad, el porcentaje de cenizas y la medida del pH de las cinco muestras de carbón. La variación de la densidad aparente con respecto al tiempo y a la temperatura de impregnación no fue significativa. Las gráficas Nos. 9 y 10 muestran los porcentajes de cenizas en función de las temperaturas y los tiempos de impregnación, respectivamente. Las gráficas Nos. 11 y 12 muestran el porcentaje de humedad en función de los tiempos y temperaturas de impregnación, respectivamente.

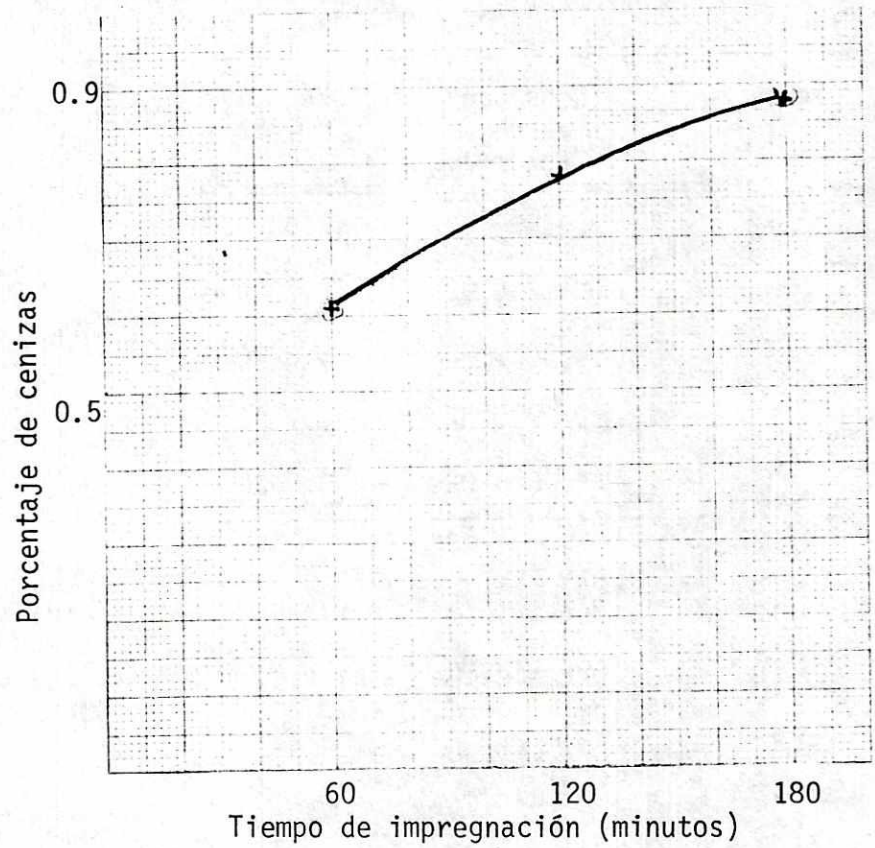
Cuadro No. 7 Densidad aparente, porcentaje de humedad, porcentaje de cenizas y pH para cinco muestras de carbón.

| Carbón No. | Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | Porcentaje de Humedad | Porcentaje de cenizas | pH       |
|------------|--|-----------------------|-----------------------|----------|
| 5          | 0.28±0.02                              | 2.03±0.01             | 0.37 ± 0.03           | 7.30±.05 |
| 6          | 0.27±0.02                              | 2.74±0.01             | 0.61 ± 0.03           | 7.21±.05 |
| 7          | 0.28±0.02                              | 5.32±0.01             | 0.93 ± 0.03           | 6.93±.05 |
| 8          | 0.27±0.02                              | 3.74±0.01             | 0.78 ± 0.03           | 7.31±.05 |
| 9          | 0.28±0.02                              | 4.86±0.01             | 0.88 ± 0.03           | 7.05±.05 |

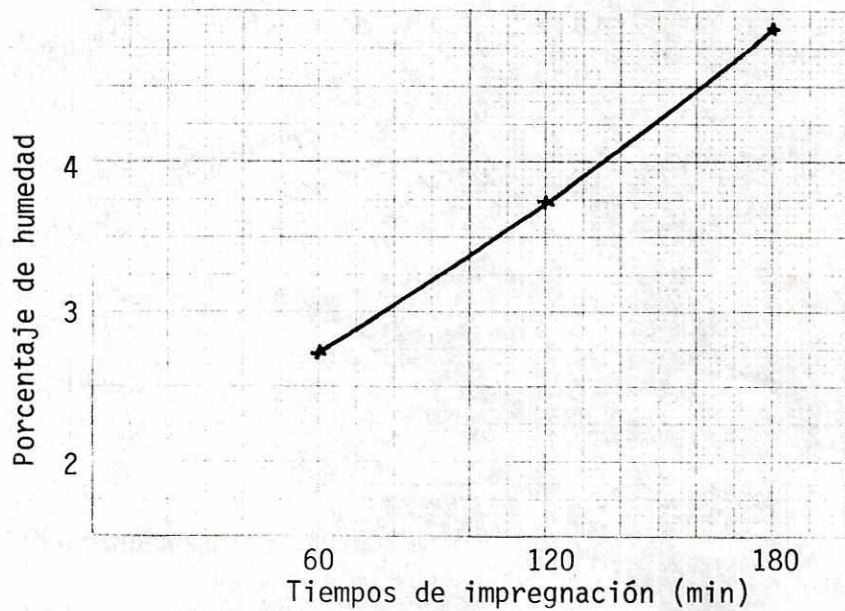
Gráfica No. 9 Porcentaje de cenizas en función de la temperatura de impregnación. Tiempo de impregnación 60 minutos.



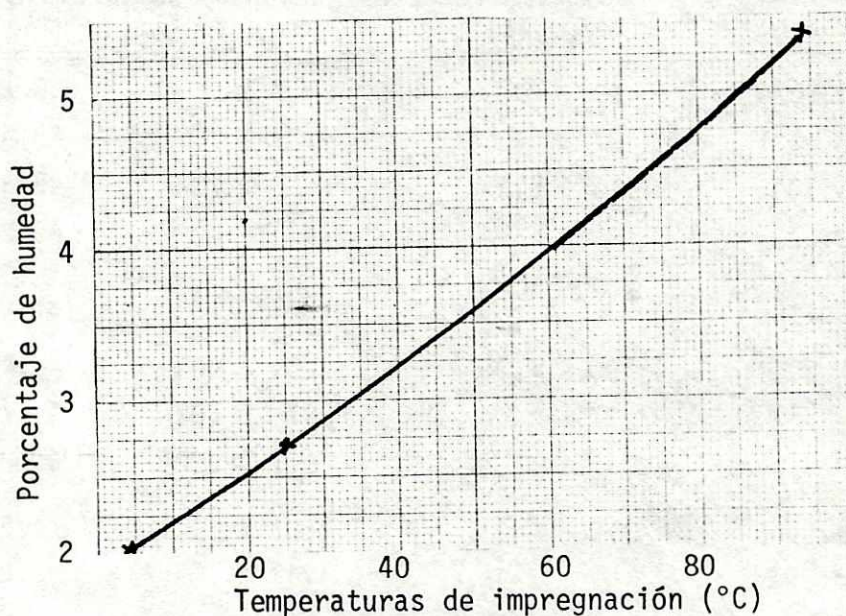
Gráfica No. 10 Porcentajes de cenizas en función de los tiempos de impregnación. Temperatura de impregnación = 25°C.



Gráfica No. 11 Porcentajes de humedad en función de los tiempos de impregnación. Temperatura de impregnación = 25°C.



Gráfica No. 12 Porcentajes de humedad en función de las temperaturas de impregnación. Tiempo de impregnación = 60 minutos.



El cuadro No. 8 muestra los datos utilizados en la obtención del número de azul de metileno. La gráfica No. 13 muestra las isotermas de adsorción del azul de metileno en las cinco muestras de carbón. En el cuadro No. 9 se presentan las líneas de regresión, calculadas aplicando la ecuación de Freundlich a los datos del cuadro No. 8. Los resultados del número de azul de metileno y del número de yodo se encuentran tabulados en el cuadro No. 10. Las gráficas Nos. 14 y 15 muestran el número de azul de metileno y el número de yodo en función del tiempo de impregnación, y las gráficas Nos. 16 y 17 muestran los mismos números en función de la temperatura de impregnación.

Cuadro No. 8 Datos experimentales utilizados en la obtención del número de azul de metileno para las muestras 5 a 9

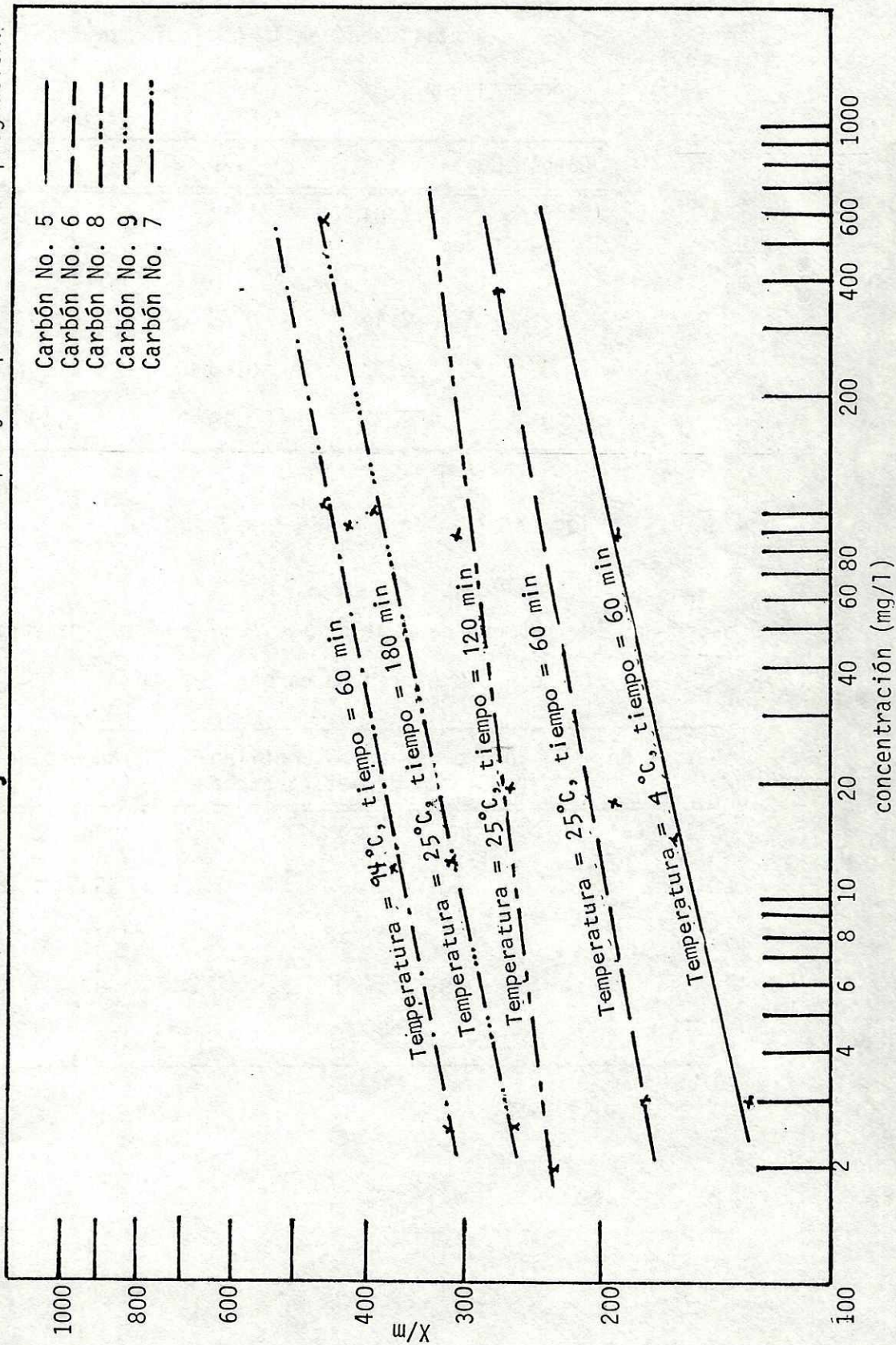
| Masa de carbón (g)<br>$\pm 2 \times 10^{-4}$ | Concentración de solución remanente (mg/l) | (C)(V**) consti-<br>tución de sol.<br>remanente (mg) | X azul de me-<br>tileno adsor-<br>bido (mg) | X/m<br>(mg/g) |
|--|--|--|---|---------------|
| 0.0674                                       | 597 $\pm$ 7                                | 29.8 $\pm$ .4  | 20.1 $\pm$ .3                               | 298 $\pm$ 4   |
| 0.2371                                       | 87 $\pm$ 1                                 | 4.37 $\pm$ .05                                       | 45.62 $\pm$ .54                             | 192 $\pm$ 2   |
| 0.3046                                       | 13.9 $\pm$ .2                              | .698 $\pm$ .008                                      | 49.3 $\pm$ .5                               | 161 $\pm$ 2   |
| 0.3735                                       | 3.01 $\pm$ .04                             | .15 $\pm$ .001                                       | 49.8 $\pm$ .6                               | 133 $\pm$ 1   |
| 0.1156                                       | 379 $\pm$ 5                                | 18.9 $\pm$ .2  | 31.0 $\pm$ .4                               | 268 $\pm$ 3   |
| 0.1961                                       | 50.9 $\pm$ .9                              | 2.59 $\pm$ .03                                       | 47.4 $\pm$ .6                               | 241 $\pm$ 3   |
| 0.2573                                       | 17.5 $\pm$ .4                              | .87 $\pm$ .01  | 49.1 $\pm$ .6                               | 190 $\pm$ 2   |
| 0.2925                                       | 3.02 $\pm$ .04                             | .151 $\pm$ .001                                      | 49.8 $\pm$ .6                               | 170 $\pm$ 2   |
| 0.0963                                       | 109 $\pm$ 2                                | 5.61 $\pm$ .07                                       | 44.5 $\pm$ .6                               | 462 $\pm$ 5   |
| 0.1063                                       | 89 $\pm$ 1                                 | 4.47 $\pm$ .05                                       | 45.5 $\pm$ .6                               | 428 $\pm$ 5   |
| 0.1358                                       | 12.2 $\pm$ .3                              | .612 $\pm$ .007                                      | 49.3 $\pm$ .6                               | 363 $\pm$ 4   |
| 0.1598                                       | 2.48 $\pm$ .04                             | .124 $\pm$ .001                                      | 49.8 $\pm$ .6                               | 312 $\pm$ 4   |
| 0.0435                                       | 711 $\pm$ 8                                | 35.5 $\pm$ .4  | 14.4 $\pm$ .1                               | 332 $\pm$ 4   |
| 0.1564                                       | 88.9 $\pm$ .9                              | 4.44 $\pm$ .05                                       | 45.5 $\pm$ .6                               | 291 $\pm$ 3   |
| 0.1897                                       | 18.7 $\pm$ .4                              | .93 $\pm$ .01  | 49.0 $\pm$ .6                               | 258 $\pm$ 3   |
| 0.2110                                       | 2.92 $\pm$ .04                             | .146 $\pm$ .001                                      | 49.8 $\pm$ .6                               | 236 $\pm$ 3   |
| 0.0475                                       | 572 $\pm$ 6                                | 28.6 $\pm$ .3  | 21.3 $\pm$ .4                               | 450 $\pm$ 5   |
| 0.1156                                       | 99 $\pm$ 1                                 | 4.99 $\pm$ .06                                       | 45.0 $\pm$ .6                               | 389 $\pm$ 4   |
| 0.1589                                       | 12.6 $\pm$ .3                              | .630 $\pm$ .007                                      | 49.3 $\pm$ .6                               | 310 $\pm$ 4   |
| 0.1918                                       | 2.42 $\pm$ .04                             | .121 $\pm$ .001                                      | 49.8 $\pm$ .6                               | 260 $\pm$ 3   |

\* Concentración de la solución luego de haber sido adsorbida por las muestras de carbón.

\*\* V = 50.00  $\pm$  .08 ml.

\*\*\* X = [50 - (C)(V)] mg.

Gráfica No. 13 Isotermas de adsorción del azul de metileno en cinco muestras de carbón activado, usando diferentes tiempos y temperaturas de impregnación.



Cuadro No. 9 Líneas de regresión calculadas con los datos del cuadro No. 8 y utilizadas en la obtención del número de azul de metileno.

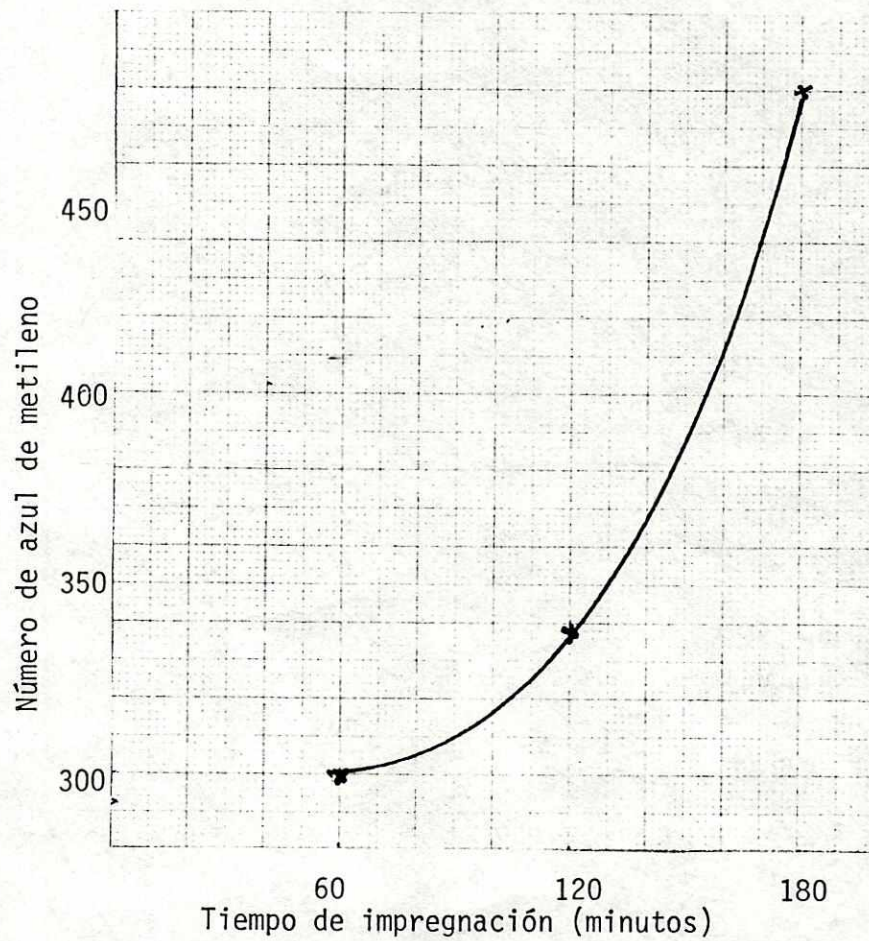
| Carbón No. | log k | 1/n  | r     |
|------------|-------|------|-------|
| 5          | 2.04  | 0.14 | 0.980 |
| 6          | 2.18  | 0.09 | 0.964 |
| 7          | 2.45  | 0.09 | 0.991 |
| 8          | 2.33  | 0.06 | 0.997 |
| 9          | 2.37  | 0.10 | 0.998 |

$$* \log (X/m) = \log k + 1/n \log C$$

Cuadro No. 10 Número de azul de metileno y número de yodo para cinco muestras de carbón.

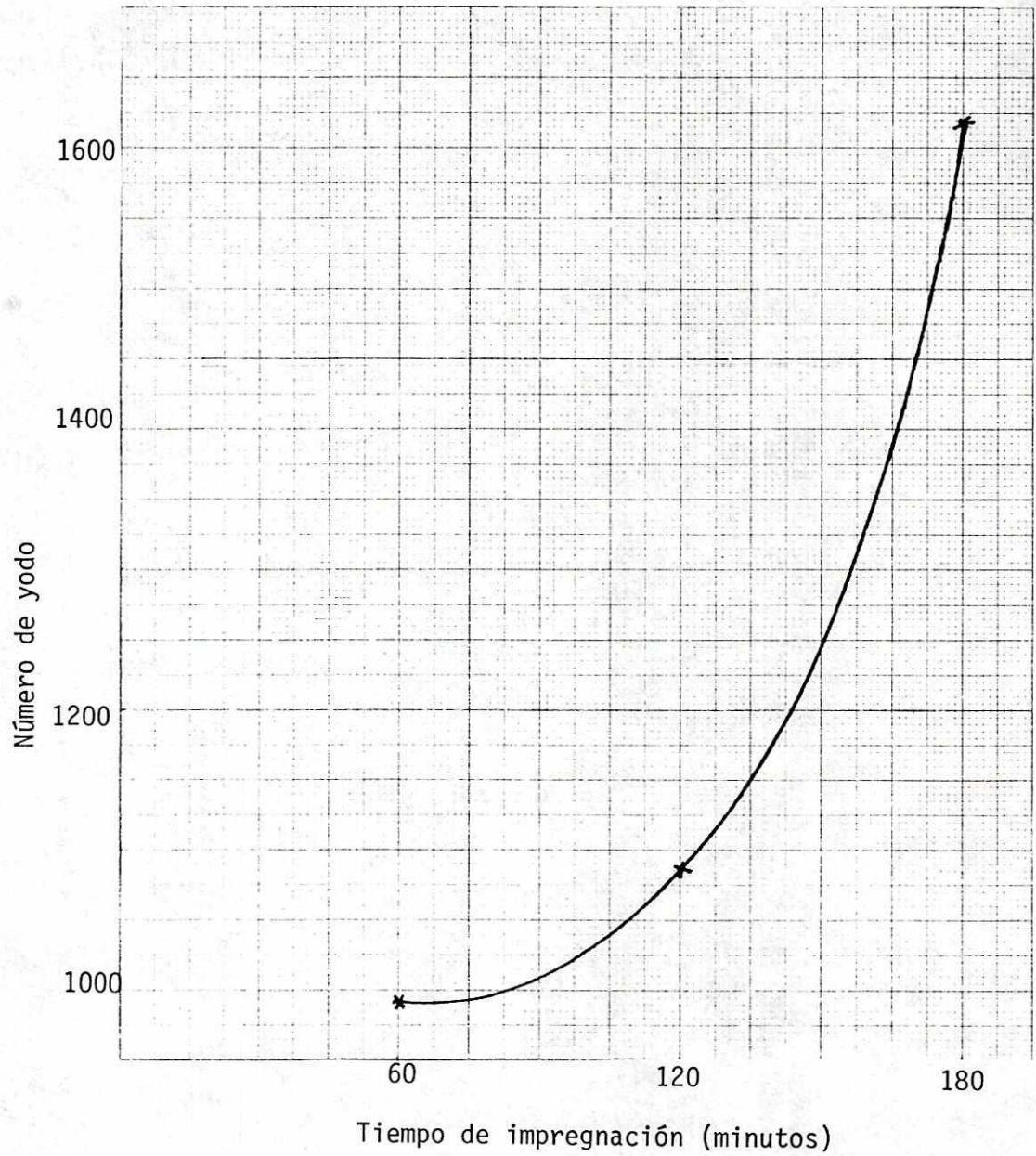
| Carbón No. | Número de azul de metileno<br>(mg. azul de met./g carbón) | Número de yodo<br>(mg yodo/g carbón) |
|------------|---|--------------------------------------|
| 5          | 303. ± 9  | 980. ± 5                             |
| 6          | 302. ± 9  | 990. ± 5                             |
| 7          | 557. ± 16   | 1771. ± 8                            |
| 8          | 338. ± 9  | 1087. ± 5                            |
| 9          | 482. ± 14   | 1619. ± 8                            |

Gráfica No. 14 Número de azul de metileno en función del tiempo de impregnación. Temperatura = 25°C

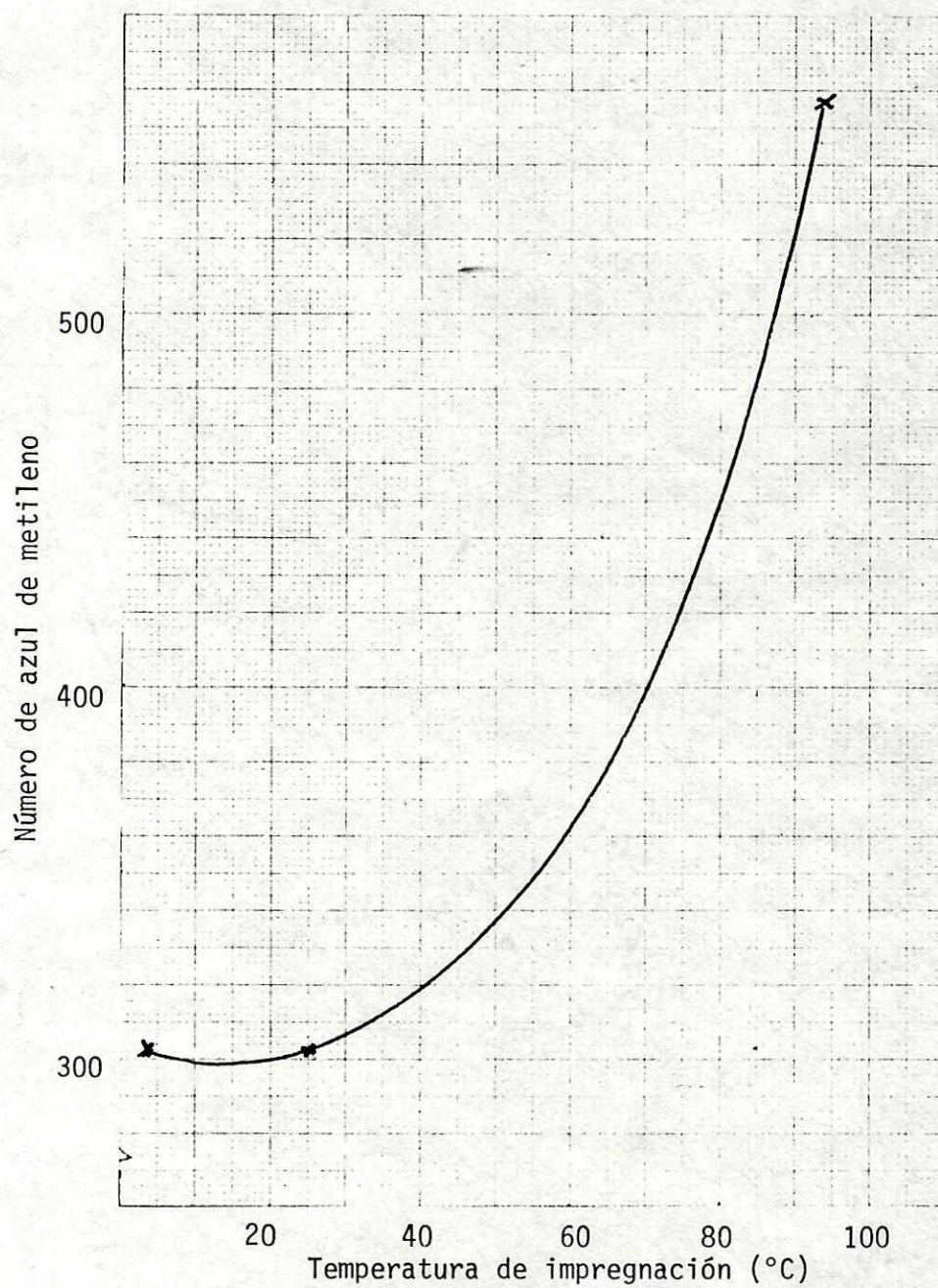


Gráfica No. 15 Número de yodo en función del tiempo de impregnación.

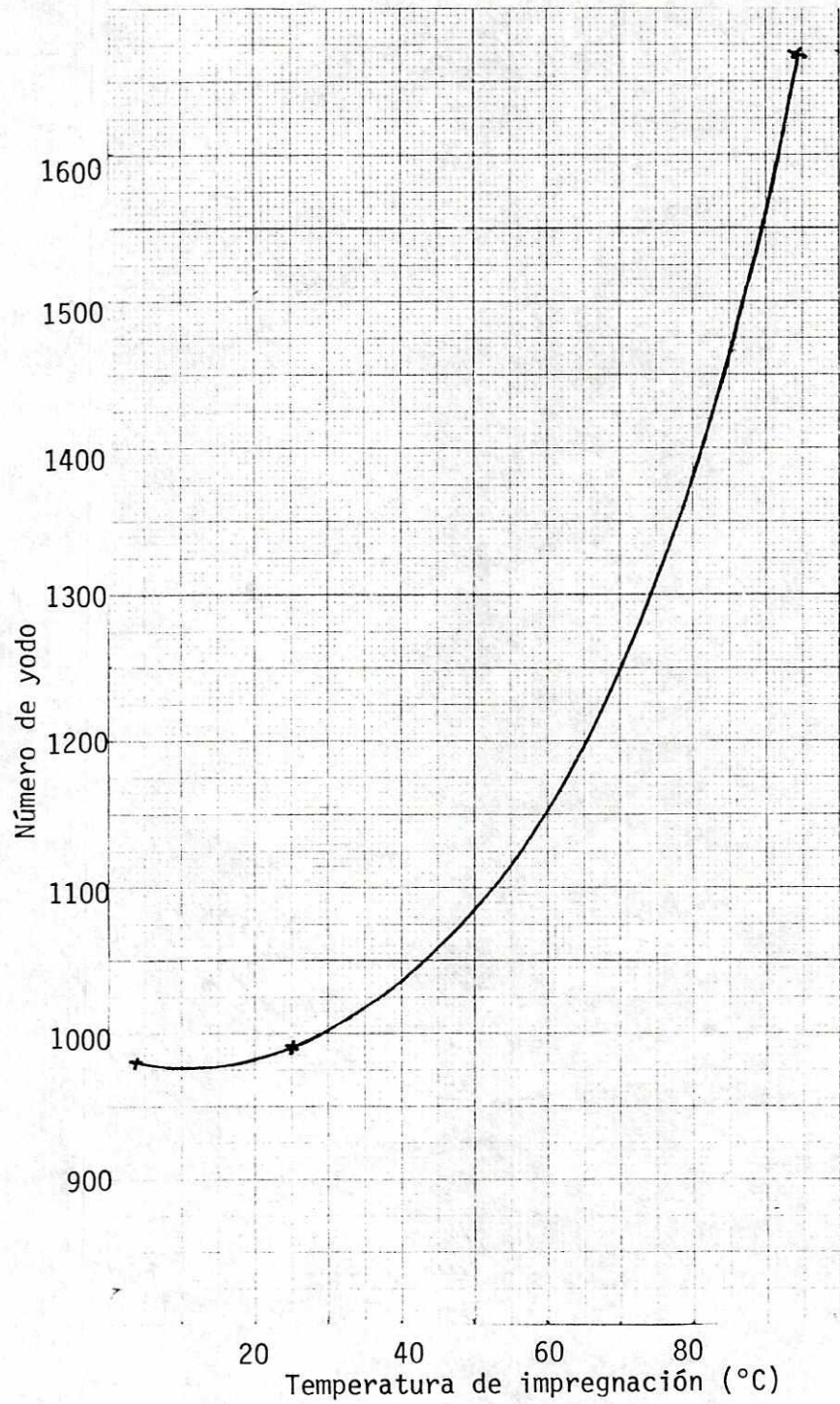
Temperatura = 25 °C



Gráfica No. 16 Número de azul de metileno en función de la temperatura de impregnación. Tiempo = 1 hora.



Gráfica No.17 Número de yodo en función de la temperatura de impregnación. Tiempo = 1 hora

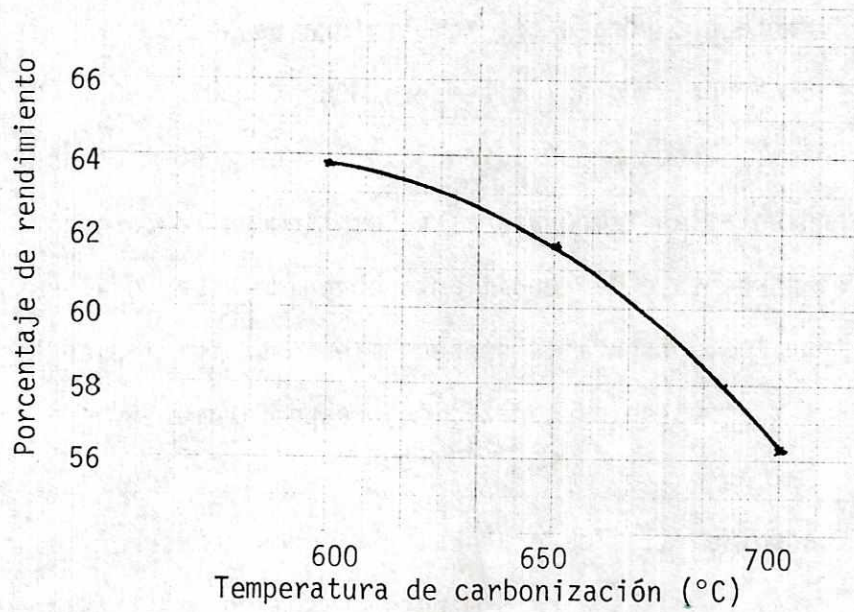


En la última parte de los ensayos de laboratorio se usó como materia prima el material que pasó el tamiz de 30 mesh; éste se impregnó durante una hora a una temperatura de 94 °C. El material impregnado fue carbonizado a las temperaturas de 600, 650 y 700 °C durante 30 minutos; luego a 650 °C durante 30, 60 y 90 minutos. El cuadro No. 11 presenta las temperaturas y los tiempos de carbonización utilizados, y el porcentaje de rendimiento obtenido. Las gráficas Nos. 18 y 19 muestran los porcentajes de rendimiento en función de las temperaturas y los tiempos de carbonización, respectivamente.

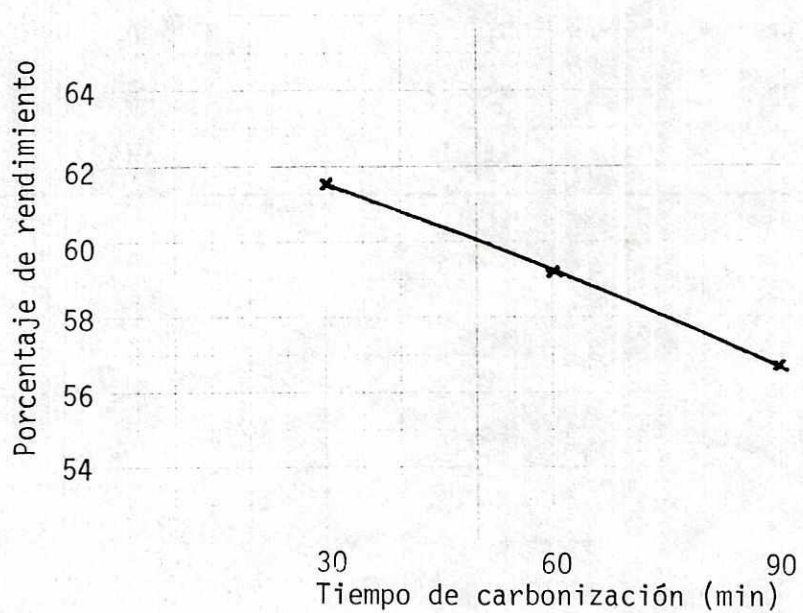
Cuadro No. 11 Temperaturas y tiempos de carbonización, y porcentajes de rendimiento de cuatro muestras de carbones.

| Carbón No. | Temperatura de carbonización (°C) | Tiempo de carbonización (min) | Porcentaje de rendimiento |
|------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 10         | 600                               | 30                            | 63.8 ± 0.1                |
| 11         | 700                               | 30                            | 56.3 ± 0.1                |
| 12         | 650                               | 60                            | 59.1 ± 0.1                |
| 13         | 650                               | 90                            | 56.7 ± 0.1                |

Gráfica No. 18 Porcentajes de rendimiento en función de las temperaturas de carbonización.



Gráfica No. 19 Porcentajes de rendimiento en función de los tiempos de carbonización.



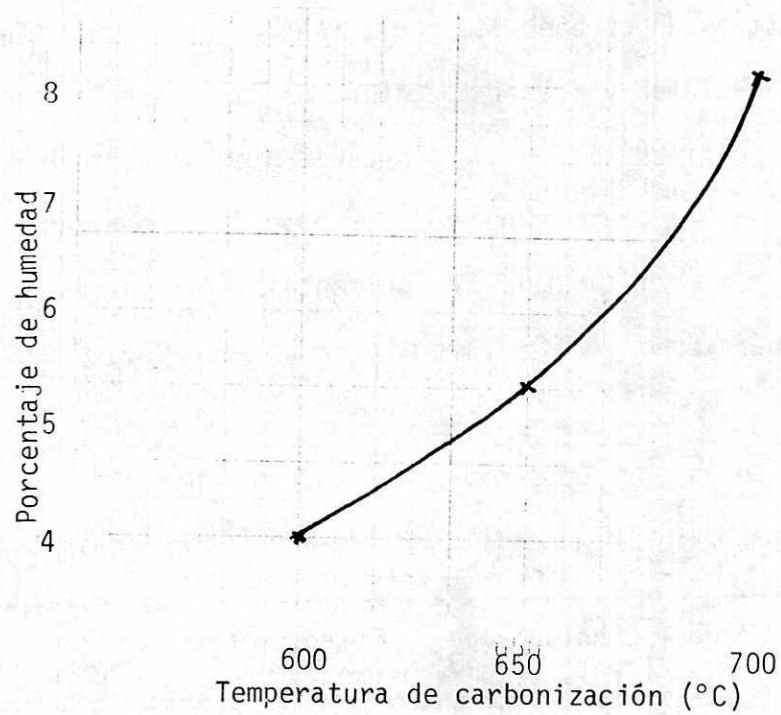
El cuadro No. 12 muestra la densidad aparente, el porcentaje de cenizas, el porcentaje de humedad y la medida del pH de las cuatro muestras de carbón. La variación de la densidad aparente con respecto al tiempo y a la temperatura de carbonización no fue significativa. Las gráficas Nos. 20 y 21 presentan en porcentaje de humedad en función de la temperatura y el tiempo de carbonización. Las gráficas Nos. 22 y 23 muestran los porcentajes de cenizas en función de las temperaturas y los tiempos de carbonización, respectivamente.

Cuadro No. 12 Densidad aparente, porcentaje de cenizas, porcentaje de humedad y pH para cuatro muestras de carbón.

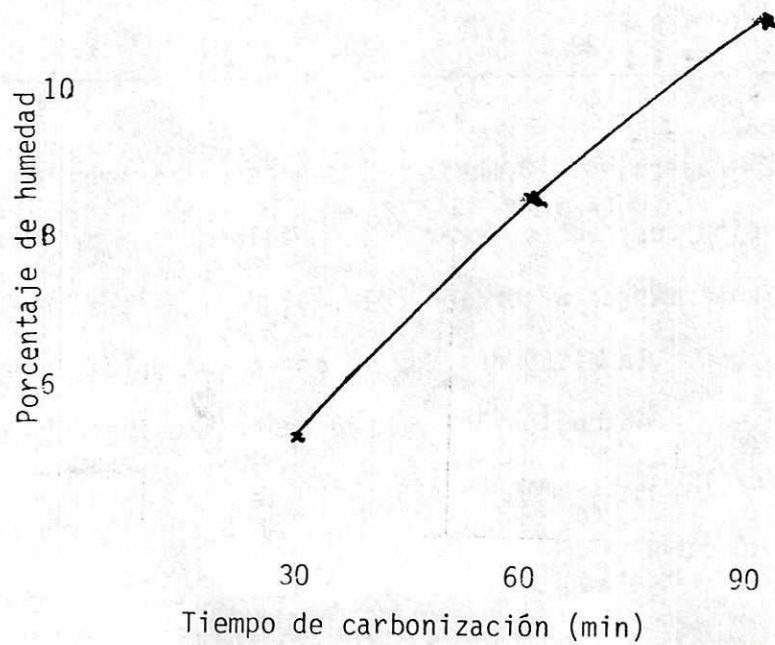
| Carbón No. | Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | Porcentaje de humedad | Porcentaje de cenizas | pH         |
|------------|--|-----------------------|-----------------------|------------|
| 10         | 0.26 ± .02                             | 4.03 ± .01            | 0.88 ± .03            | 6.83 ± .05 |
| 11         | 0.29 ± .02                             | 8.16 ± .01            | 1.05 ± .03            | 6.92 ± .05 |
| 12         | 0.25 ± .02                             | 8.52 ± .01            | 1.15 ± .03            | 7.01 ± .05 |
| 13         | 0.28 ± .02                             | 10.89 ± .01           | 1.38 ± .03            | 7.12 ± .05 |

El cuadro No. 13 muestra los datos experimentales utilizados en la obtención del número de azul de metileno. La gráfica No. 24 muestra las isotermas de adsorción del azul de metileno en las cuatro muestras de carbón. En el cuadro No. 14 están los datos experimentales utilizados en la obtención del número de eritrosina. La gráfica No. 25 muestra las isotermas de adsorción de la eritrosina en las cuatro muestras de carbón.

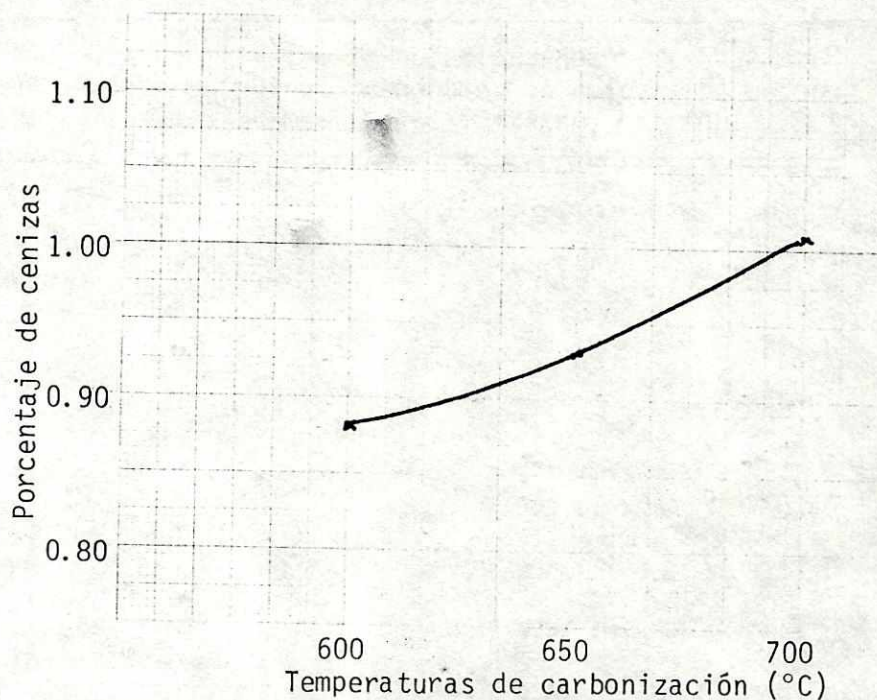
Gráfica No. 20 Porcentajes de humedad en función de la temperatura de carbonización. Tiempo = 30 minutos.



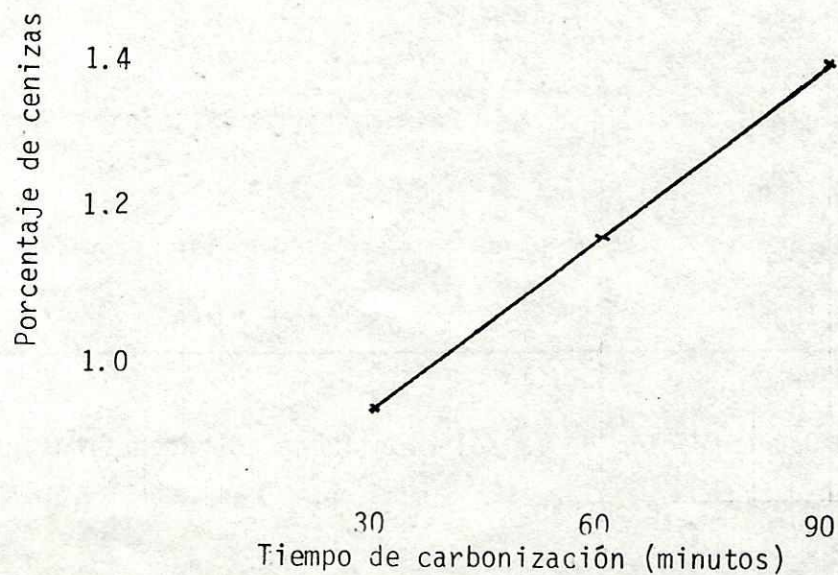
Gráfica No. 21 Porcentajes de humedad en función del tiempo de carbonización. Temperatura = 650°C.



Gráfica No. 22 Porcentajes de cenizas en función de las temperaturas de carbonización. Tiempo = 30 minutos



Gráfica No. 23 Porcentajes de cenizas en función de los tiempos de carbonización. Temperatura = 650 °C.



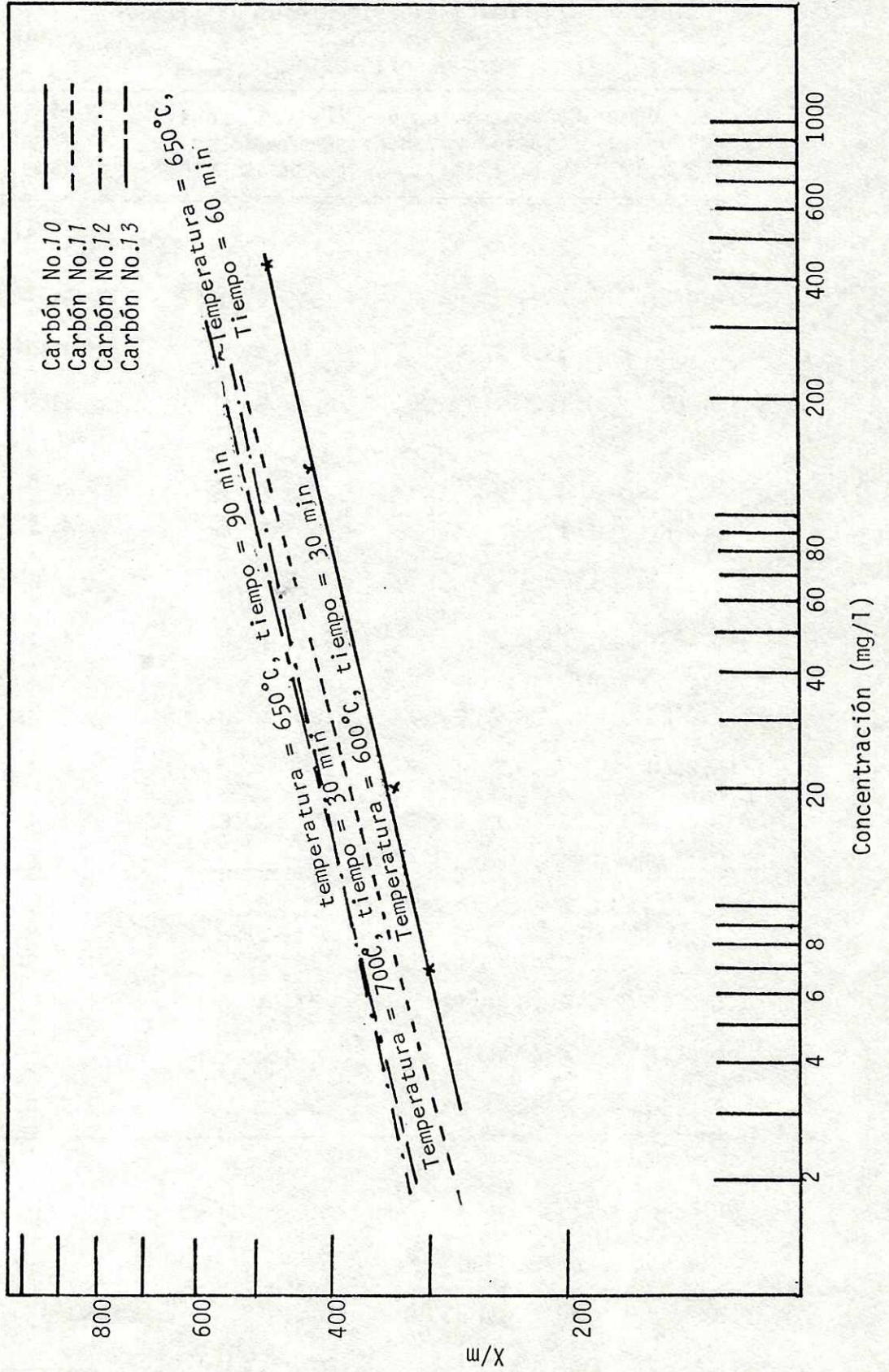
Cuadro No. 13 Datos experimentales utilizados en la obtención del número de azul de metileno para las muestras 10 a 13

| Masa de carbón (g)<br>$\pm 2 \times 10^{-4}$ | Concentración de solución remanente (mg/l)* | (C)(V**) consti-<br>tución de sol.<br>remanente (mg) | X azul de me-<br>tileno adsor-<br>bido (mg) | X/m<br>(mg/g) |
|--|---|--|---|---------------|
| 0.0594                                       | 435 $\pm$ 5                                 | 21. $\pm$ .2   | 28.2 $\pm$ .2                               | 475 $\pm$ 6   |
| 0.1000                                       | 150 $\pm$ 2                                 | 7.50 $\pm$ .08                                       | 42.4 $\pm$ .5                               | 424 $\pm$ 5   |
| 0.1457                                       | 20.7 $\pm$ .2                               | 1.03 $\pm$ .01                                       | 48.9 $\pm$ .6                               | 336 $\pm$ 5   |
| 0.1659                                       | 6.83 $\pm$ .08                              | .342 $\pm$ .004                                      | 49.6 $\pm$ .5                               | 299 $\pm$ 4   |
| 0.1027                                       | 94 $\pm$ 1                                  | 4.71 $\pm$ .05                                       | 45.3 $\pm$ .5                               | 440 $\pm$ 6   |
| 0.1193                                       | 20.5 $\pm$ .2                               | 1.02 $\pm$ .01                                       | 49.9 $\pm$ .5                               | 410 $\pm$ 5   |
| 0.1453                                       | 3.14 $\pm$ .04                              | .157 $\pm$ .001                                      | 49.8 $\pm$ .5                               | 343 $\pm$ 5   |
| 0.2000                                       | 1.10 $\pm$ .01                              | .055 $\pm$ .001                                      | 49.9 $\pm$ .5                               | 249 $\pm$ 4   |
| 0.0955                                       | 111 $\pm$ 1                                 | 5.55 $\pm$ .05                                       | 44.4 $\pm$ .5                               | 465 $\pm$ 6   |
| 0.1081                                       | 37.5 $\pm$ .4                               | 1.87 $\pm$ .02                                       | 48.12 $\pm$ .5                              | 445 $\pm$ 6   |
| 0.1376                                       | 5.29 $\pm$ .06                              | .265 $\pm$ .001                                      | 49.7 $\pm$ .5                               | 361 $\pm$ 5   |
| 0.1548                                       | 2.84 $\pm$ .03                              | .142 $\pm$ .001                                      | 49.8 $\pm$ .5                               | 322 $\pm$ 5   |
| 0.0465                                       | 450 $\pm$ 5                                 | 22.5 $\pm$ .2  | 27.4 $\pm$ .2                               | 591 $\pm$ 7   |
| 0.1086                                       | 43.5 $\pm$ .5                               | 2.17 $\pm$ .03                                       | 47.8 $\pm$ .5                               | 440 $\pm$ 5   |
| 0.1372                                       | 6.43 $\pm$ .07                              | .322 $\pm$ .001                                      | 49.6 $\pm$ .5                               | 362 $\pm$ 4   |
| 0.1596                                       | 3.37 $\pm$ .04                              | .169 .001  | 49.8 .5                                     | 312 4         |

\* Concentración de la solución luego de haber sido adsorbido por las muestras de carbón.

\*\* V = 50.00  $\pm$  0.08 ml

Gráfica No. 24 Isotermas de adsorción del azul de metileno en cuatro muestras de carbón activado a diferentes tiempos y temperaturas.



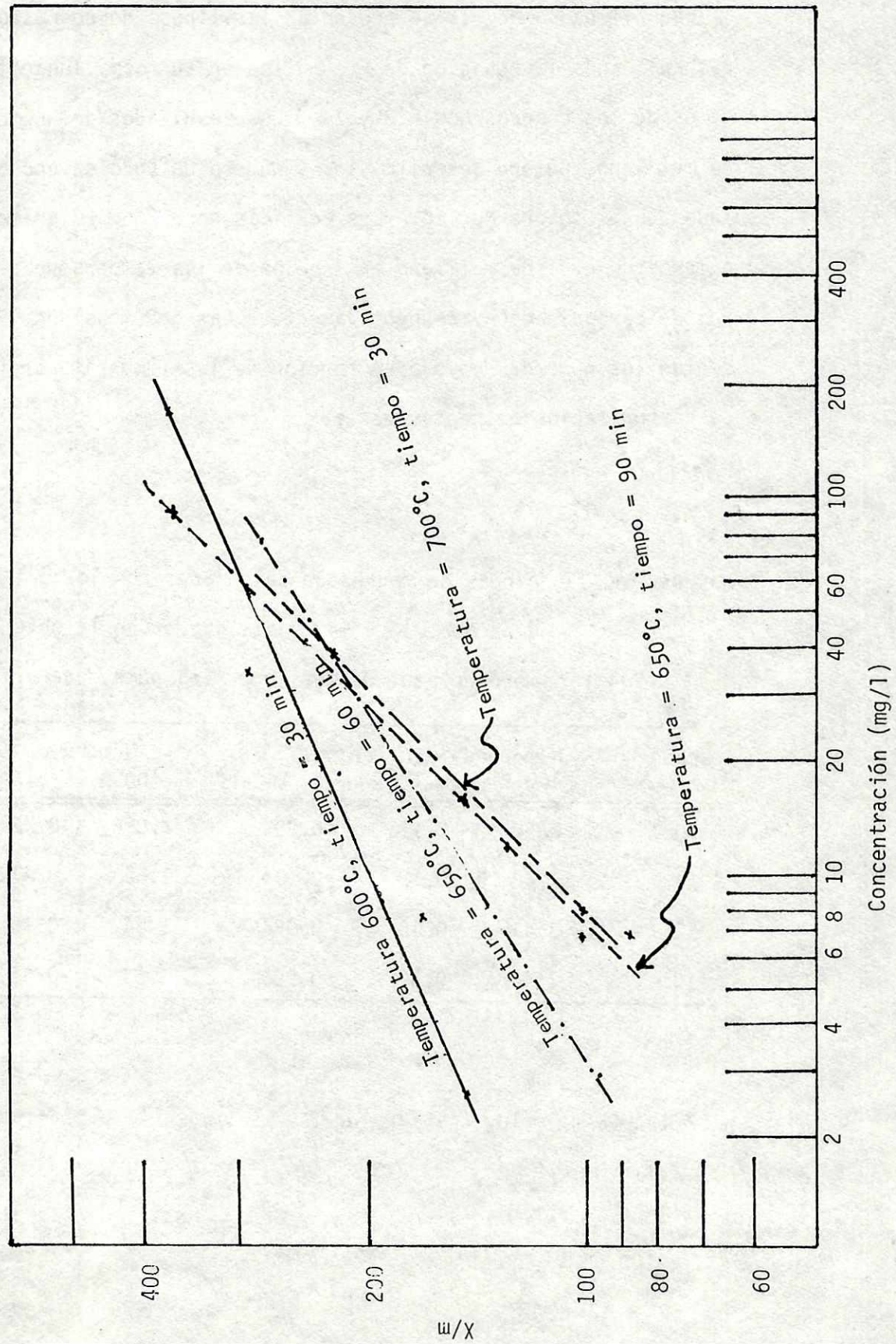
Cuadro No. 14 Datos experimentales utilizados en la obtención del número de eritrosina.

| Masa de carbón (g) $\pm 2 \times 10^{-4}$ | Concentración de solución remanente (mg/l)* | (C)(V**) consti- tución de sol. remanente (mg) | X eritrosi- na adsorbida (mg) | X/m (mg/g)  |
|---|---|--|-------------------------------|-------------|
| 0.0676                                    | 2.54 $\pm$ .03                              | .127 $\pm$ .01                                 | 9.87 $\pm$ .1                 | 146 $\pm$ 2 |
| 0.0587                                    | 7.25 $\pm$ .08                              | .363 $\pm$ .004                                | 9.63 $\pm$ .1                 | 164 $\pm$ 2 |
| 0.0290                                    | 33.6 $\pm$ .4                               | 1.68 $\pm$ .02                                 | 8.31 $\pm$ .09                | 286 $\pm$ 3 |
| 0.0033                                    | 175 $\pm$ 2                                 | 8.78 $\pm$ .09                                 | 1.21 $\pm$ .02                | 363 $\pm$ 4 |
| 0.0414                                    | 34.6 $\pm$ .4                               | .732 $\pm$ .08                                 | 9.26 $\pm$ .1                 | 223 $\pm$ 3 |
| 0.0762                                    | 11 $\pm$ .1                                 | .552 $\pm$ .006                                | 9.4 $\pm$ .1                  | 123 $\pm$ 1 |
| 0.1094                                    | 6.54 $\pm$ .07                              | .327 $\pm$ .004                                | 9.7 $\pm$ .1                  | 88 $\pm$ 1  |
| 0.0237                                    | 71 $\pm$ 1                                  | 3.57 $\pm$ .04                                 | 6.43 $\pm$ .07                | 271 $\pm$ 3 |
| 0.0425                                    | 17.8 $\pm$ .2                               | .89 $\pm$ .01                                  | 9.1 $\pm$ .1                  | 214 $\pm$ 3 |
| 0.0660                                    | 10.5 $\pm$ .1                               | 2.526 $\pm$ .006                               | 9.4 $\pm$ .1                  | 143 $\pm$ 2 |
| 0.0239                                    | 69.9 $\pm$ .8                               | 3.49 $\pm$ .04                                 | 6.50 $\pm$ .08                | 272 $\pm$ 3 |
| 0.1018                                    | 2.93 $\pm$ .03                              | .145 $\pm$ .001                                | 9.8 $\pm$ .1                  | 96 $\pm$ 1  |
| 0.0357                                    | 38.7 $\pm$ .4                               | 1.93 $\pm$ .02                                 | 8.06 $\pm$ .09                | 225 $\pm$ 3 |
| 0.0642                                    | 15.5 $\pm$ .2                               | .777 $\pm$ .009                                | 9.2 $\pm$ .1                  | 143 $\pm$ 2 |
| 0.0711                                    | 9.4 $\pm$ .1                                | .474 $\pm$ .005                                | 9.5 $\pm$ .1                  | 133 $\pm$ 3 |
| 0.0960                                    | 7.58 $\pm$ .09                              | .379 $\pm$ .004                                | 9.62 $\pm$ .1                 | 100 $\pm$ 1 |

\* Concentración de la solución luego de haber sido adsorbida por las muestras de carbón.

\*\* V = 100.00  $\pm$  .08 ml.

Gráfica No. 25 Isotermas de adsorción de la eritrosina en cuatro muestras de carbón activado a diferentes tiempos y temperaturas.



En el cuadro No. 15 se presentan las líneas de regresión, calculadas aplicando la ecuación de Freundlich en su forma logarítmica a los datos de los cuadros Nos. 13 y 14. Los resultados del número de azul de metileno, número de eritrosina y número de yodo se encuentran tabulados en el cuadro No. 16. Las gráficas Nos. 26 y 27 presentan los números de azul de metileno en función de las temperaturas y los tiempos de carbonización, respectivamente. Las gráficas Nos. 28 y 29 presentan los números de yodo en función de las temperaturas y los tiempos de carbonización respectivamente.

Cuadro No. 15 Líneas de regresión\* calculadas con los datos de los cuadros Nos. 13 y 14, y utilizados en la obtención del número de azul de metileno y el número de eritrosina.

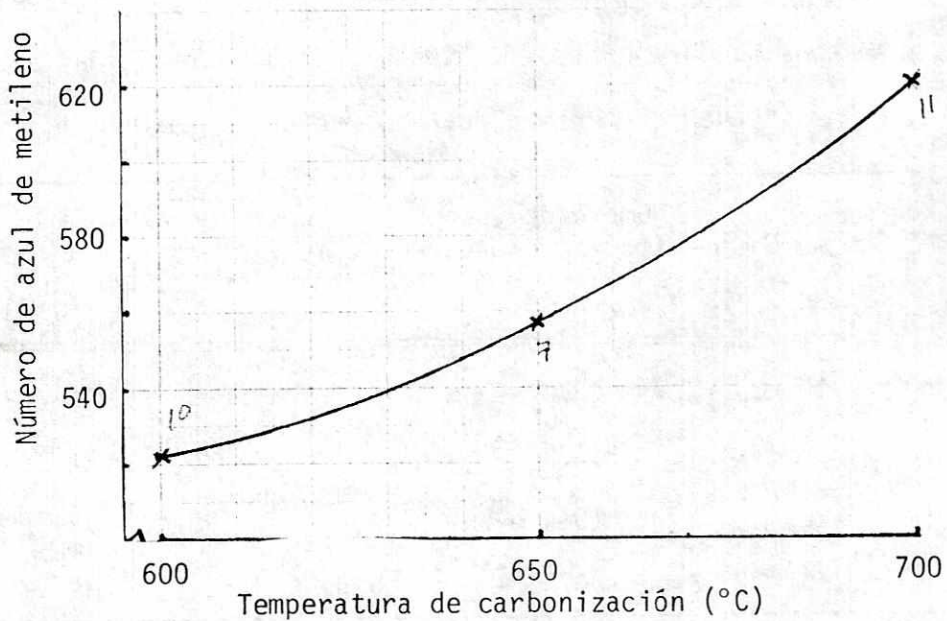
| Carbón No. | Número de azul de metileno |      |       | Número de Eritrosina |      |       |
|------------|----------------------------|------|-------|----------------------|------|-------|
|            | log k                      | 1/n  | r     | log k                | 1/n  | r     |
| 10         | 2.38                       | 0.11 | 0.999 | 2.05                 | 0.23 | 0.980 |
| 11         | 4.43                       | 0.12 | 0.934 | 1.52                 | 0.47 | 0.990 |
| 12         | 2.47                       | 0.10 | 0.980 | 1.84                 | 0.33 | 0.972 |
| 13         | 2.44                       | 0.12 | 0.995 | 1.63                 | 0.45 | 0.970 |

$$* \log (X/m) = \log k + 1/n \log C$$

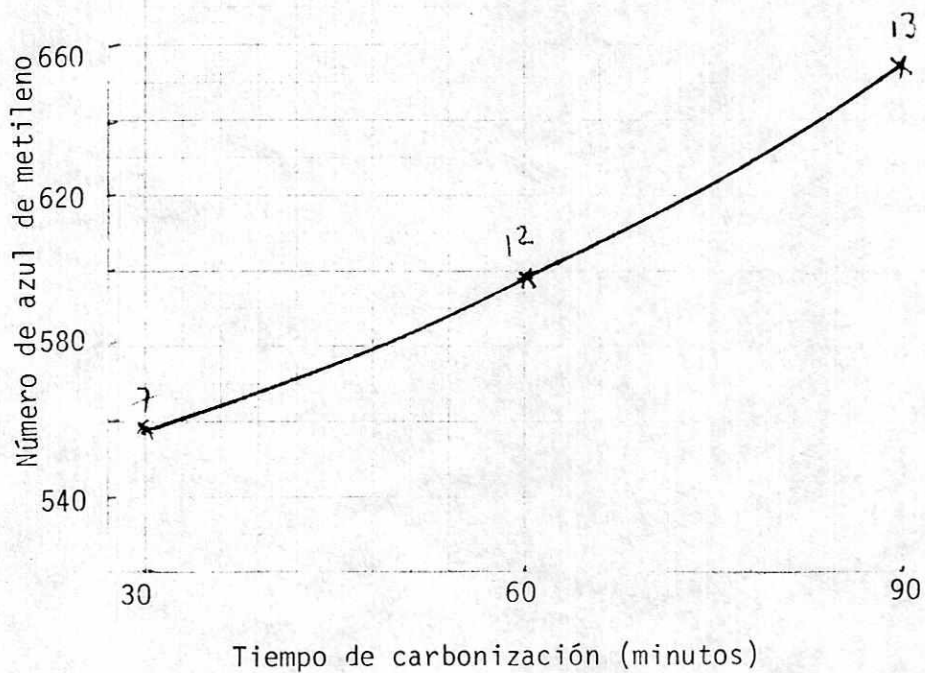
Cuadro No. 16 Número de yodo, número de azul de metileno y número de eritrosina para cuatro muestras de carbón producidas a diferentes tiempos y temperaturas de carbonización.

| Carbón No. | Número de yodo<br>(mg. yodo/g carbón) | Número de azul de metileno<br>(mg. azul metileno/g. carbón) | Número de eritrosina<br>(mg. eritrosina/g carbón) |
|------------|---------------------------------------|---|---|
| 10         | 1670. $\pm$ 8                         | 523. $\pm$ 15   | 390. $\pm$ 13                                     |
| 11         | 1672. $\pm$ 8                         | 620. $\pm$ 18   | 473. $\pm$ 16                                     |
| 12         | 1904. $\pm$ 9                         | 596. $\pm$ 17   | 413. $\pm$ 14                                     |
| 13         | 2074. $\pm$ 10                        | 654. $\pm$ 19   | 473. $\pm$ 16                                     |

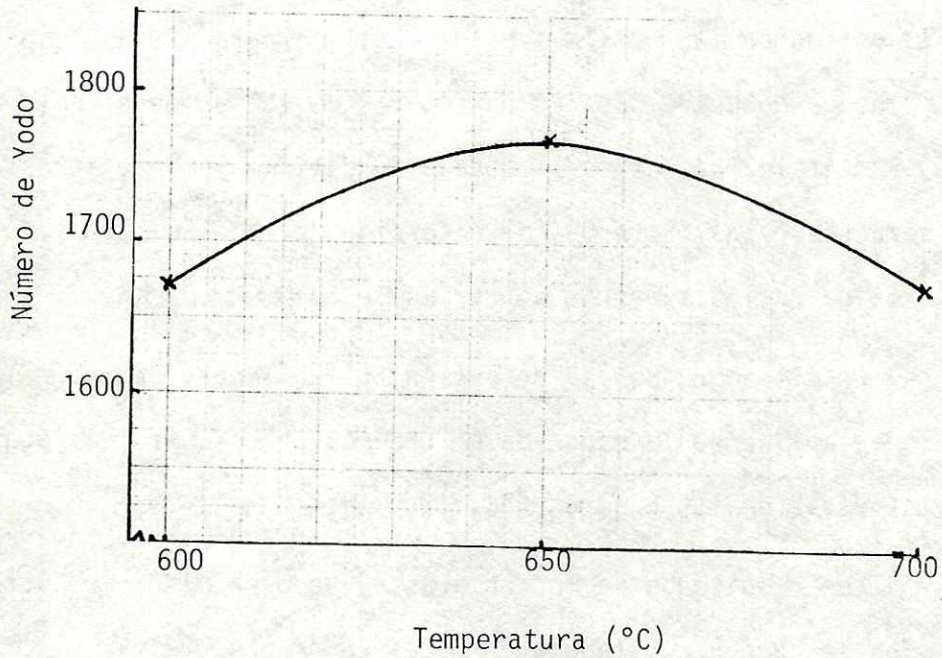
Gráfica No. 26 Números de azul de metileno en función de la temperatura de carbonización. Tiempo = 30 minutos.



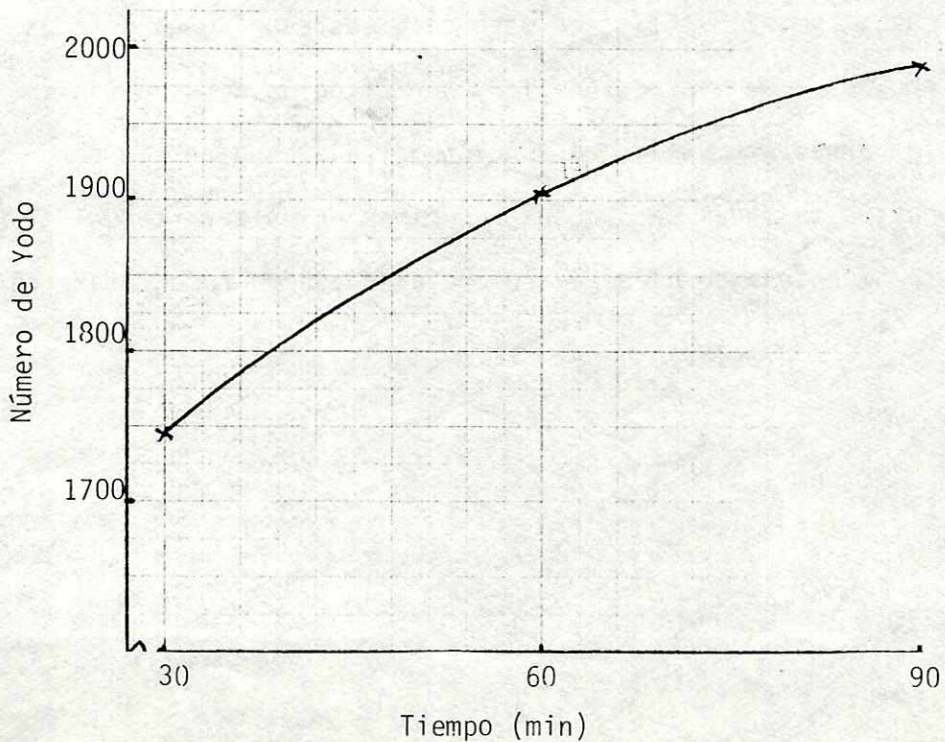
Gráfica No. 27 Números de azul de metileno en función del tiempo de carbonización. Temperatura = 650 °C.



Gráfica No. 28 Números de yodo en función de la temperatura de carbonización. Tiempo = 30 minutos.



Gráfica No. 29 Números de yodo en función del tiempo de carbonización. Temperatura = 650 °C.



El cuadro No. 17 muestra los datos experimentales utilizados en la obtención del número azul de metileno para las dos muestras de carbones comerciales. En el cuadro No. 18 se muestran los datos experimentales usados en la obtención del número de eritrosina de dichos carbones. Las isotermas de adsorción del azul de metileno y la eritrosina en las muestras de carbón se presentan en la gráfica No. 30

En el cuadro No. 19 se presentan las líneas de regresión, calculadas aplicando la ecuación de Freundlich en su forma logarítmica a los datos de los cuadros No. 17 y 18.

Los resultados de los números de yodo, azul de metileno y eritrosina se encuentran tabulados en el cuadro No. 20.

Con los resultados que aparecen en el cuadro No. 16 y 19, se calcularon los resultados de las áreas acumuladas que aparecen en el cuadro No. 21 utilizando para ello las ecuaciones citadas en el cuadro No. 1 de la sección II. La gráfica No. 31 muestra las curvas de las áreas acumuladas en función del diámetro de los poros para las cuatro muestras de carbón producidas en esta parte del trabajo y para dos muestras de carbones comerciales usados como referencia.

Cuadro No. 17 Datos experimentales utilizados en la obtención del No. de azul de metileno para 2 muestras comerciales de carbón

|            | Masa de carbón (g)<br>$\pm 2 \times 10^{-4}$ | Concentración de solución remanente (mg/L) * | (C)(V**) constitución de sol. remanente (mg) | X azul de metileno adsorbido (mg) | X/m (mg/g) |
|------------|--|--|--|-----------------------------------|------------|
| Caigón RL  | 0.3679                                       | 5.302  | 0.265  | 49.735                            | 135.2      |
|            | 0.2867                                       | 21.042                                       | 1.052  | 48.948                            | 170.7      |
|            | 0.2134                                       | 89.351                                       | 4.467  | 45.533                            | 213.4      |
|            | 0.1035                                       | 440.613                                      | 22.026                                       | 27.974                            | 270.3      |
| Darco S-51 | 0.6374                                       | 27.328                                       | 1.366  | 48.634                            | 76.3       |
|            | 0.3789                                       | 46.745                                       | 2.337  | 47.663                            | 125.8      |
|            | 0.2593                                       | 150.179                                      | 7.507  | 42.493                            | 163.9      |
|            | 0.0970                                       | 610.718                                      | 30.529                                       | 19.471                            | 200.7      |

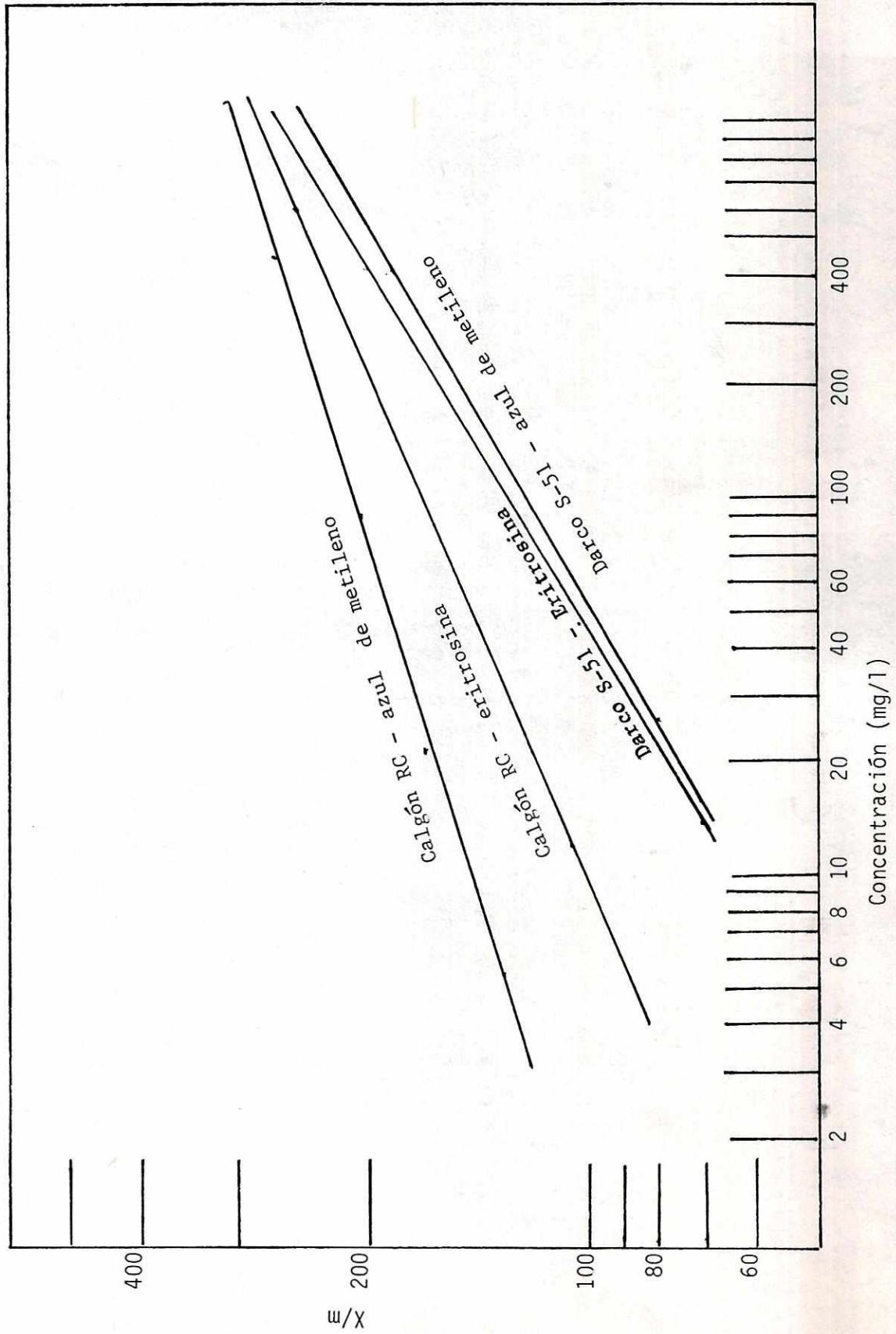
Cuadro No. 18 Datos experimentales utilizados en la obtención del No. de eritrosina para 2 muestras comerciales de carbón.

|            | Masa de carbón (g)<br>$\pm 2 \times 10^{-4}$ | Concentración de solución remanente | (C)(V**) constitución de sol. remanente (mg) | X de eritrosina adsorbida (mg) | X/m (mg/g) |
|------------|--|-------------------------------------|--|--------------------------------|------------|
| Caigón RL  | 0.3722                                       | 12.124                              | 0.606  | 39.394                         | 105.83     |
|            | 0.2620                                       | 46.351                              | 2.317  | 37.683                         | 143.85     |
|            | 0.1759                                       | 151.763                             | 7.586  | 32.414                         | 184.30     |
|            | 0.0411                                       | 605.342                             | 30.260                                       | 9.740                          | 236.8      |
| Darco S-51 | 0.5949                                       | 13.531                              | 0.676  | 39.324                         | 66.1       |
|            | 0.3871                                       | 46.778                              | 2.338  | 37.662                         | 97.3       |
|            | 0.2302                                       | 163.861                             | 8.191  | 31.809                         | 138.2      |
|            | 0.1009                                       | 44.753                              | 21.083                                       | 18.917                         | 187.4      |

\* Concentración de la solución remanente luego de haber sido adsorbida por las muestras de carbón.

\*\*  $V = 50.00 \pm 0.08$  ml .

Gráfica No. 30 Isotermas de adsorción de azul de metileno y eritrosina en dos muestras de carbones comerciales activados.



Cuadro No. 19 Líneas de regresión\* calculadas a partir de los datos que aparecen en los cuadros Nos. 17 y 18, y utilizadas en la obtención del número de azul de metileno y del número de eritrosina de los carbones activados comerciales.

| Carbón     | Adsorbato        | log k  | 1/n  | r     |
|------------|------------------|--------|------|-------|
| Calgón RL  | azul de metileno | 161.12 | 0.26 | 0.961 |
| Darco S-51 | azul de metileno | 107.35 | 0.16 | 0.944 |
| Calgón RL  | eritrosina       | 129.26 | 0.18 | 0.921 |
| Darco S-51 | eritrosina       | 77.51  | 0.28 | 0.968 |

$$* \log (X/m) = \log k + 1/n \log C$$

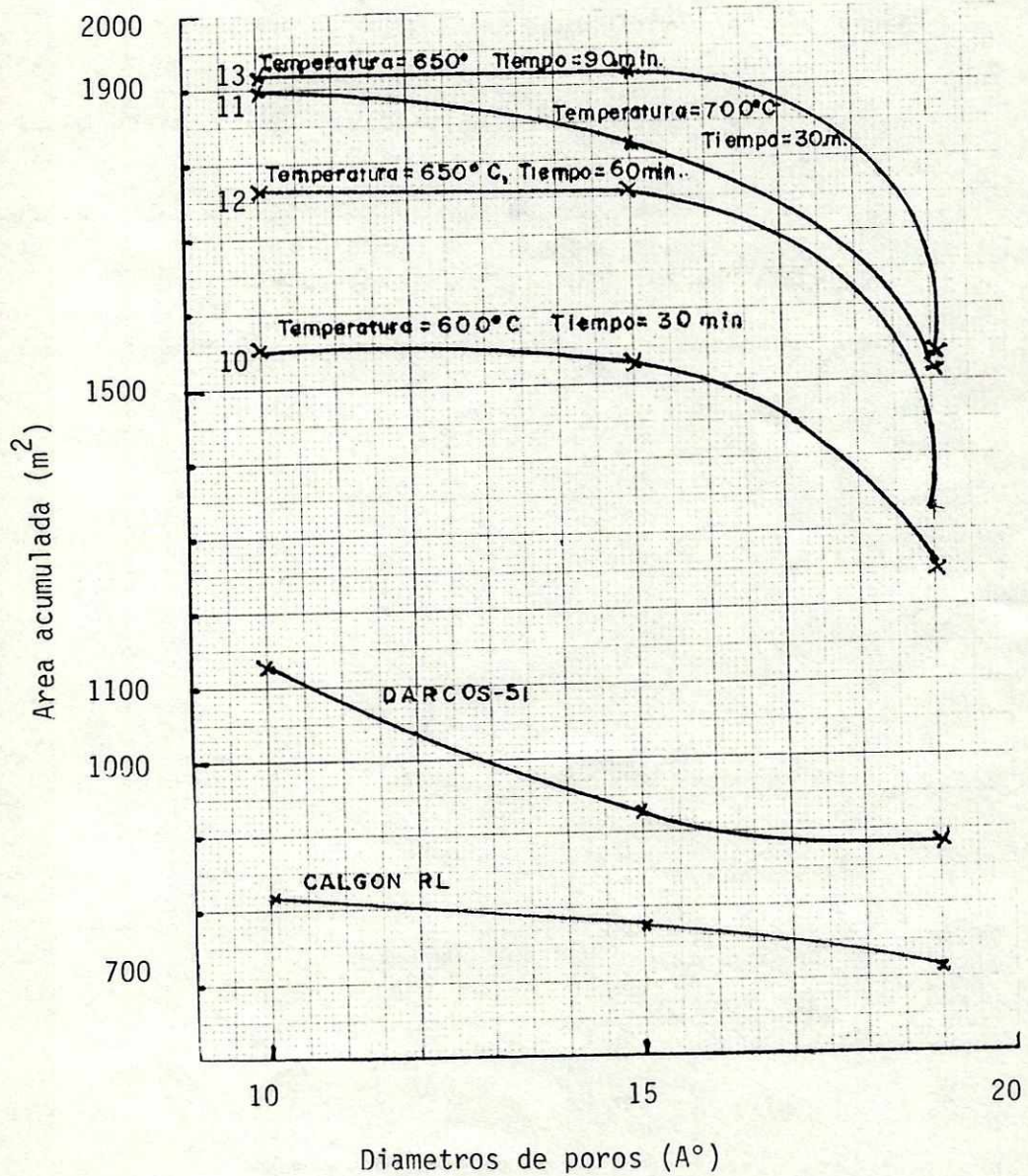
Cuadro No. 20 Número de yodo, número de azul de metileno y número de eritrosina para los carbones activados comerciales estudiados.

| Nombre     | Número de Yodo<br>(mg yodo/g carbón) | Número de azul de metileno<br>(mg azul de metileno/g carbón) | Número de eritrosina<br>(mg de eritrosina/g de carbón) |
|------------|--------------------------------------|--|--|
| Darco S-51 | 898                                  | 264  | 229  |
| Calgón     | 1214                                 | 317  | 283  |

Cuadro No. 21 Area en los poros mayores que 10, 15 y 19 Å, para todas las muestras preparadas de carbón y dos muestras de carbones comerciales

| Carbón No. | Area (m <sup>2</sup> ) en los poros mayores que |            |            |
|------------|---|------------|------------|
|            | 10 Å  | 15 Å       | 19 Å       |
| 1          | 155. ± 2  | 135. ± 6   |            |
| 2          | 174. ± 2  | 140. ± 7   |            |
| 3          | 188. ± 2  | 169. ± 8   |            |
| 4          | 212. ± 2  | 189. ± 9   |            |
| 5          | 900. ± 9  | 890. ± 44  |            |
| 6          | 910. ± 9  | 888. ± 44  |            |
| 7          | 1640. ± 16                                      | 1638. ± 80 |            |
| 8          | 1000 ± 10                                       | 993. ± 45  |            |
| 9          | 1418. ± 14                                      | 1407. ± 70 |            |
| 10         | 1544. ± 15                                      | 1539. ± 75 | 1244. ± 60 |
| 11         | 1900 ± 19                                       | 1824. ± 91 | 1520. ± 75 |
| 12         | 1763 ± 18                                       | 1754. ± 87 | 1320. ± 65 |
| 13         | 1923 ± 19                                       | 1922. ± 90 | 1520. ± 75 |
| Calgón RE  | 823. ± 8  | 777. ± 35  | 709. ± 35  |
| Parco S-51 | 1118. ± 10                                      | 931. ± 45  | 887. ± 44  |

Grafica No. 31 Areas acumuladas en función de los diámetros de los poros para seis muestras de carbón activado.



Los cuadros Nos. 22, 23 y 24 presentan un resumen de los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas en los carbones estudiados y de las condiciones en las que fueron preparados. El cuadro No. 25 muestra las especificaciones de los carbones activados comerciales, dadas por los fabricantes.

Cuadro No. 22 Condiciones de preparación de los carbones producidos en el laboratorio.

| Carbón No. | Tamaño promedio de partícula (mm) | Impregnación |                  | Carbonización |                  |
|------------|-----------------------------------|--------------|------------------|---------------|------------------|
|            |                                   | tiempo (min) | temperatura (°C) | tiempo (min)  | temperatura (°C) |
| 1          | 2.6                               |              |                  | 30            | 650              |
| 2          | 1.3                               |              |                  | 30            | 650              |
| 3          | 0.75                              |              |                  | 30            | 650              |
| 4          | 0.47                              |              |                  | 30            | 650              |
| 5          | 0.47                              | 60           | 4                | 30            | 650              |
| 6          | 0.47                              | 60           | 25               | 30            | 650              |
| 7          | 0.47                              | 60           | 94               | 30            | 650              |
| 8          | 0.47                              | 120          | 25               | 30            | 650              |
| 9          | 0.47                              | 180          | 25               | 30            | 650              |
| 10         | 0.47                              | 60           | 94               | 30            | 600              |
| 11         | 0.47                              | 60           | 94               | 30            | 700              |
| 12         | 0.47                              | 60           | 94               | 60            | 650              |
| 13         | 0.47                              | 60           | 94               | 90            | 650              |

Cuadro No. 23 Porcentaje de rendimiento, densidad aparente, porcentaje de cenizas y porcentaje de humedad de los carbones estudiados.

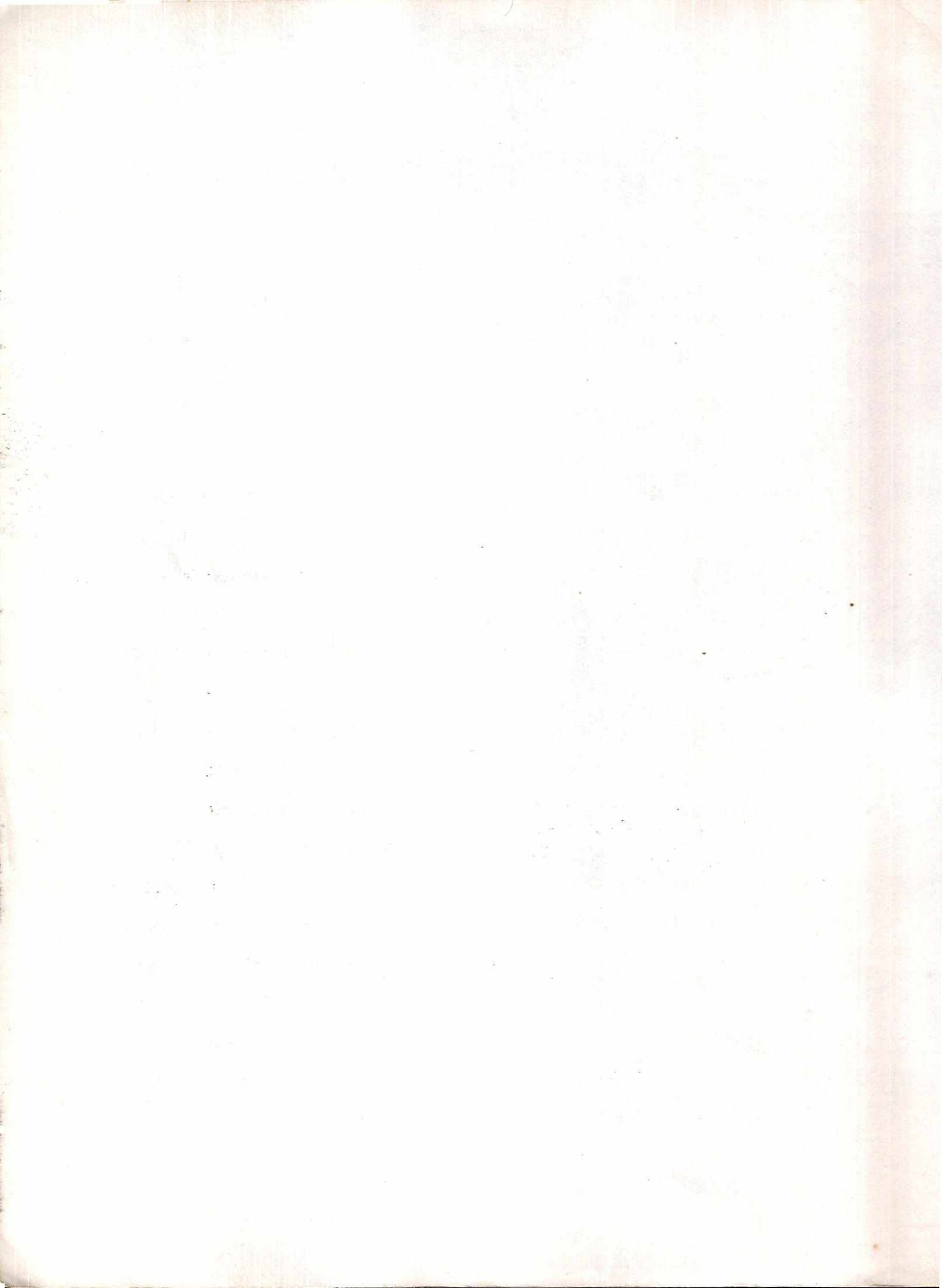
| Carbón No. | Porcentaje de rendimiento | densidad aparente (g/ml) | porcentaje de cenizas | porcentaje de humedad |
|------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1          | 21.7                      | 0.54                     | 0.37                  | 2.23                  |
| 2          | 19.3                      | 0.52                     | 0.38                  | 2.26                  |
| 3          | 19.0                      | 0.50                     | 0.36                  | 2.83                  |
| 4          | 18.4                      | 0.46                     | 0.37                  | 3.52                  |
| 5          | 53.2                      | 0.28                     | 0.37                  | 2.03                  |
| 6          | 54.2                      | 0.27                     | 0.61                  | 2.74                  |
| 7          | 61.7                      | 0.28                     | 0.93                  | 5.32                  |
| 8          | 55.9                      | 0.27                     | 0.78                  | 3.74                  |
| 9          | 56.1                      | 0.28                     | 0.88                  | 4.86                  |
| 10         | 63.8                      | 0.26                     | 0.88                  | 4.03                  |
| 11         | 56.3                      | 0.29                     | 1.05                  | 8.16                  |
| 12         | 59.1                      | 0.25                     | 1.15                  | 8.52                  |
| 13         | 56.7                      | 0.28                     | 1.38                  | 10.89                 |
| Darco S-51 |                           | 0.51                     | 5.32                  | 12.08                 |
| Calgón RL  |                           | 0.48                     | 8.58                  | 2.37                  |

Cuadro No. 24 Número de yodo, número de azul de metileno y número de eritrosina para las muestras de carbón estudiadas.

| Carbón No. | número de yodo<br>(mg yodo/g car-<br>bón) | número de azul de<br>metileno (mg. azul<br>met. /g. carbón) | número de eritrosina<br>(mg. eritrosina/g.<br>carbón) |
|------------|---|---|---|
| 1          | 183                                       | 46.51   |   |
| 2          | 204                                       | 48.18   |   |
| 3          | 219                                       | 58.09   |   |
| 4          | 244                                       | 64.73   |   |
| 5          | 980                                       | 303.04  |   |
| 6          | 990                                       | 302.48  |   |
| 7          | 1771                                      | 557.57  |   |
| 8          | 1087                                      | 338.06  |   |
| 9          | 1619                                      | 482.72  |   |
| 10         | 1670                                      | 523.72  | 390.3   |
| 11         | 1672                                      | 620.58  | 473.2   |
| 12         | 1904                                      | 596.76  | 413.0   |
| 13         | 2075                                      | 654.18  | 473.2   |
| Darco S-51 | 898                                       | 264.72  | 229.7   |
| Calgón RC  | 1214                                      | 317.14  | 283.2   |

Cuadro No. 25 Especificaciones de los carbones comerciales activados  
dadas por los fabricantes

| Carbón      | porcentaje<br>de humedad<br>máximo | porcentaje<br>de cenizas<br>máximo | pH  | densidad<br>aparente<br>(mg/l) | número de<br>yodo (mg.<br>yodo/g carbón) |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------|-----|--------------------------------|--|
| Calgón BL   | 2                                  | 8.5                                |     | 0.51                           |  |
| Calgón RC   | 2                                  | 23                                 |     | 0.48                           |  |
| Darco KB    | 33                                 | 3-6                                | 5   | 0.42                           |  |
| Darco G-60  | 12                                 | 3-4                                | 5-7 | 0.35                           |  |
| Darco S-51  | 12                                 |                                    | 5   | 0.51                           |  |
| Amoco PX-23 |                                    | 2.5                                | 4-6 | 0.24                           | 3200-3500                                |
| Amoco PX-24 |                                    |                                    |     | 0.61                           | 1900-2100                                |
| Amoco GX-22 |                                    | 2.0                                |     | 0.26                           | 2200-2600                                |



## XI. DISCUSION DE RESULTADOS

En esta investigación se desea producir carbón activado a partir de la cáscara de la semilla del hule que se considera apropiada para este propósito, debido a la dureza y consistencia. En la literatura ( ) se encuentra la producción de dicho carbón a partir de las cáscaras de las nueces de plantas como la macadamia y otras de naturaleza bastante parecida a la de la cáscara de la semilla del hule. El contenido de cenizas en este material es de  $0.23 \pm 0.03\%$ . La cantidad de cenizas encontrada para la cáscara de la semilla del hule es comparable con la de otros materiales usados para la producción de carbón activado (cuadro No. 1, sección IV). Para los propósitos de este trabajo, el contenido de cenizas señalado nos sugiere que la cáscara de la semilla del hule es una materia prima adecuada.

La primera parte de los ensayos de laboratorio tuvo por objeto comprobar la capacidad adsortiva del carbón producido por pirólisis del material en función del tamaño de las partículas. De acuerdo con el cuadro No. 2, los carbones estudiados tienen un porcentaje similar de cenizas. Este porcentaje de cenizas proviene del material original, ya que en esta parte no se usó ningún activante que aumentara el contenido de sales minerales. A este nivel no se puede evaluar la capacidad de adsorción de los carbones producidos en función del porcentaje de cenizas; sin embargo, es importante anotar que la adsorción es significativamente menor que la de los carbones comerciales activados.

El pH de los carbones obtenidos en esta parte estuvo entre 7.52 y 8.02; margen de valores que se deben al contenido de cenizas en el car-

bón, y que son adecuados para trabajar en medios neutros o ligeramente alcalinos.

En general, se obtuvo un porcentaje de humedad más alto en los carbones más adsorbentes, debido a su mayor capacidad de retener la humedad del medio ambiente (cuadro No. 1, Gráfica No. 2).

Con respecto a la densidad aparente que es un factor importante en las aplicaciones del carbón a nivel industrial, nos interesa comparar los valores de densidad aparente de los carbones obtenidos con los de otros carbones activados de uso rutinario en la industria. En este sentido, se observa que los valores logrados son más altos que los que se reportan para los carbones comerciales. Cuadro No. 1. La variación de la densidad aparente para los cuatro tamaños de partículas es leve, pero se observa un ligero aumento en relación directa al tamaño de las partículas, como lo indica la gráfica No. 1. Esto, unido a la observación de que el porcentaje de rendimiento se incrementa al aumentar el tamaño de las partículas, como se observa en la gráfica No. 3, nos da un indicio de que es mayor la cantidad de resinas extraídas del carbón de menor tamaño. Lo anterior indica una relación inversa entre el tamaño de la partícula y la cantidad de poros expuestos, lo cual se debe probablemente a que, en el momento de la carbonización, los macroporos de las partículas de mayor tamaño son obstruidas por las resinas no liberadas, y no se forman los microporos. Este hecho quedó verificado experimentalmente al realizar las pruebas de adsorción del yodo y el azul de metileno. Como lo indican las gráficas 5 y 6, la tendencia en la adsorción del yodo y el azul de metileno es la mis

ma, pero es significativamente más adsorbente el carbón producido con un material de partícula más pequeña.

Las isotermas de adsorción del azul de metileno (gráfica No.4) nos muestran que el grado de adsorción de estos carbones puede ser comparado a cualquier concentración de la solución dentro del rango usado y no depende del grado de decoloración, no obstante unos carbones son más efectivos que otros en cuanto a la adsorción del azul de metileno se refiere. La baja pendiente de las líneas nos indica que los carbones se pueden usar adecuadamente en suspensión.

Hasta ahora se ha presentado una discusión acerca de las características más importantes de los carbones no activados producidos en el laboratorio. Ahora es necesario comparar la capacidad de adsorción de estos carbones con la de los carbones comerciales más utilizados en la industria. Como se hizo notar con anterioridad, la capacidad de adsorción de los carbones no activados es significativamente menor que la de los carbones comerciales activados. El bajo contenido de cenizas, y la deficiente capacidad de adsorción de los carbones que nos ocupan, hace pensar que la capacidad adsortiva del carbón se puede mejorar considerablemente mediante el proceso de impregnación.

En la segunda parte del trabajo de laboratorio se usó el material que pasa el tamiz de 30 mesh, porque es el tamaño de partícula que dió los mejores resultados. En ella se desea conocer la importancia del proceso de impregnación y estudiar las variables de tiempo y temperatura.

Mediante la impregnación se observa una mejora significativa del rendimiento en la producción con respecto a los carbones no activados (cuadros Nos. 2 y 6), lo que probablemente se deba a que la presencia de activantes químicos durante la carbonización permite la formación de una menor cantidad de resinas. Es posible, como lo indica Smisek y Cerny (7), que en el momento de la carbonización el activante químico forme un esqueleto sobre el cual se depositan los cristallitos, y que al lavar el carbón, queden los espacios libres para adsorber otras sustancias.

El proceso de impregnación está determinado por las variables de temperatura y tiempo. Se observa en la gráfica No. 7 que el porcentaje de rendimiento está en relación directa con la temperatura utilizada en la impregnación. Probablemente la acción deshidratante del cloruro de zinc es mayor al aumentar la temperatura, ya que la movilidad de los iones y la penetración de éstos dentro de la partícula también es mayor. En la gráfica No.8 se nota un aumento en el rendimiento al incrementarse el tiempo de impregnación, ya que la penetración del cloruro de zinc en la partícula es mayor al aumentar el tiempo de contacto. Sin embargo, parece ser que un aumento en la temperatura dá mejores resultados en el porcentaje de rendimiento que un aumento en el tiempo.

Tal como se esperaba, la capacidad de adsorción del carbón producido a partir de la materia prima impregnada, aumentó considerablemente en relación a la de los carbones no activados (cuadros Nos. 5 y 10).

En esta parte del trabajo, y mediante la impregnación, se logró en los carbones una capacidad de adsorción similar o mejor a la de los carbones comerciales. Asimismo, dicha capacidad aumenta en función del aumento del contenido de cenizas

La relación entre los porcentajes de cenizas y el tiempo de impregnación, así como los porcentajes de cenizas y la temperatura, son similares a las observadas para los porcentajes de rendimiento en función del tiempo de impregnación y la temperatura. El porcentaje de cenizas aumenta al incrementar la temperatura de impregnación (gráfica No. 9). Esto nos sugiere que el zinc pasa a formar parte de la estructura del carbón, ya que no se elimina totalmente con un lavado exhaustivo. Igualmente ocurre al aumentar el tiempo de impregnación y mantener constante la temperatura (gráfica No. 10).

Los porcentajes de cenizas en los carbones comerciales son mayores que los obtenidos en los carbones que nos ocupan cuadros Nos. 7 y 23).

En general se observó una disminución en la densidad aparente de los carbones activados comparada con la de los no activados, que se debe al aumento de la porosidad como resultado de la acción del activante químico durante la carbonización (cuadros No 1 y 7). La densidad aparente de los carbones comerciales es un poco mayor que la de los carbones producidos en el laboratorio mediante el procedimiento señalado. No se observó ningún cambio significativo en la densidad aparente de los carbones producidos a diferentes tiempos y temperaturas de impregnación (cuadro No. 7). Para explicarlo es razonable suponer que la acción de la sal inorgánica que fomenta la formación de

los cristallitos, actúa en forma similar para las condiciones probadas de tiempo y temperatura de impregnación. Si hubo algún cambio en la porosidad de los distintos carbones, no pudo ser detectado mediante la prueba. Un factor que puede ser determinante es la concentración del activante que no se probó en este trabajo, sino se usó la recomendada en la literatura.

Si comparamos las isotermas de adsorción del azul de metileno en las muestras de carbón activado (gráfica No. 13) con las de los carbones no activados (gráfica No. 4), notamos que los valores de las pendientes de las rectas son parecidos (cuadros Nos. 4 y 9), lo que nos hace pensar que estos carbones también pueden ser usados en suspensión, pero con un grado de adsorción mayor, comparable con el de los carbones comerciales.

La adsorción del yodo y del azul de metileno muestra un aumento significativo al incrementar el tiempo de impregnación (gráficas Nos. 14 y 15). De igual manera se observa que entre la adsorción del azul de metileno y el yodo en los carbones producidos usando las temperaturas de impregnación de 4 y 20°C, no hay diferencia notoria. Sin embargo, al aumentar la temperatura de impregnación a 94 °C, se incrementa en gran medida la adsorción (gráficas Nos. 16 y 17). Esto nos sugiere que hay un gran aumento en el número de microporos cuando la temperatura y el tiempo de impregnación son mayores.

En la tercera parte del trabajo de laboratorio se desea conocer la relación que presenta las mejores condiciones de operación entre las variables de tiempo y temperatura usadas en el proceso de carbonización. En este caso, se escogió la temperatura de impregnación de 94°C y el tiempo de una hora, por ser el tiempo más corto usado en los ensayos anteriores, y obtenerse los mejores resultados de adsorción.

A medida que la temperatura de carbonización se incrementa, el porcentaje de cenizas crece ya que parte del carbón se pierde en forma de dióxido de carbono y, por consiguiente, el porcentaje de rendimiento disminuye (gráficas Nos. 18 y 20). En igual forma ocurre con el incremento en el tiempo de carbonización, el porcentaje de cenizas aumenta y el porcentaje de rendimiento disminuye (gráficas Nos. 19 y 21).

La densidad aparente no muestra ningún cambio significativo cuando aumentan la temperatura y el tiempo de carbonización. Los aumentos en el área y en el número de microporos no pueden ser detectados por esta prueba como ocurre positivamente con las pruebas de adsorción. La densidad aparente de los carbones producidos en el laboratorio es menor que la de los carbones comerciales.

El pH fue similar para todas las muestras estudiadas de carbón, el cual varía entre 6.93 y 7.12, rango en el que se pueden usar adecuadamente. La adsorción de los carbones en función de la concentración de la solución es similar para todos los carbones que fueron preparados en esta parte (gráfica No. 24). Este hecho nos sugiere

que los carbones son igualmente efectivos para la adsorción de partículas de alrededor de 15  $\text{Å}$ , y que su eficiencia es aproximadamente igual para todo el rango de concentraciones usadas, sin depender del grado de decoloración.

Para el caso de la adsorción de la eritrosina, las isotermas obtenidas no son paralelas (gráfica No. 25) por lo que no podemos comparar su eficiencia a cualquier concentración. Podemos decir que los carbones Nos. 11 (preparado a 700  $^{\circ}\text{C}$  durante 30 minutos) y 13 (a 650  $^{\circ}\text{C}$  durante 90 minutos), son más efectivos para ser usados en lechos, para la adsorción de sustancias de tamaño molecular y naturaleza similar a la eritrosina, y concentración mayor de 50 mg/l; y que los carbones Nos. 10 (preparado a 650  $^{\circ}\text{C}$  durante 30 minutos) y 12 (a 650  $^{\circ}\text{C}$  durante 60 minutos), son más efectivos para ser usados en suspensión y a concentraciones más bajas.

Por otra parte, observamos en la gráfica No. 28 el comportamiento no lineal del número de yodo en función de la temperatura de carbonización; posiblemente este comportamiento se debe a que 650  $^{\circ}\text{C}$  sea una temperatura óptima para que se formen más poros de diámetros entre 10 y 15  $\text{Å}$ . Al mantener constante la temperatura de carbonización y variar el tiempo de 30 a 90 minutos, notamos un aumento en la adsorción del yodo (gráfica No. 29). Al obtener una mayor adsorción del yodo usando tiempos de carbonización más largos a 650  $^{\circ}\text{C}$ , es evidente que se aumenta el área de adsorción en los poros de diámetros mayores que 10  $\text{Å}$ .

El número de azul de metileno aumenta al incrementarse la tempera-

tura de carbonización (gráfica No.26), esto se puede explicar si pensamos en que a una temperatura de carbonización de 700 °C, sólo se aumenta el número de poros mayores que 15 °A. El número de azul de metileno también aumenta al incrementarse el tiempo de carbonización (gráfica No. 27).

En general, se puede observar (gráfica No. 31) que el carbón No. 13 (preparado a 650 °C durante 90 minutos ) es el que cuenta con la mayor cantidad de área acumulada y le siguen el carbón No. 11 (700 °C durante 30 minutos), el carbón No. 12 (650 °C durante 60 minutos), y el carbón No. 10 (600 °C durante 30 minutos). Los carbones Nos. 12 y 13, preparados a 650 °C, presentan curvas similares. Tal parece que a esta temperatura el aumento del área se hace mayor en poros que van desde 15 a 20 °A, y que el tiempo solamente hace que el mismo efecto se produzca en mayor grado.

La forma de las curvas obtenidas para los carbones Nos. 10 (preparado a 600 °C durante 30 minutos) y 11 (700 °C durante 30 minutos), también son similares. En este caso, el parámetro que se varió fue la temperatura, lo que hace pensar que no sólo existe una relación del área acumulada con el tiempo de carbonización, sino que también con con la temperatura. Por consiguiente, no podemos afirmar con certeza qué parámetro determina el comportamiento de la curva, y que para aproximarse más a la naturaleza del proceso se deben medir las variaciones simultáneas de ambos parámetros, y así, conocer la interrelación que existe entre ellos.

Todos los carbones producidos en esta parte resultaron ser superiores en el grado de adsorción que los carbones comerciales (cuadros Nos. 16 y 20).

Hasta el momento se ha discutido aisladamente cada uno de los aspectos de los carbones producidos, ahora se hace necesario englobar estos aspectos para decidir las condiciones que son las más adecuadas para satisfacer los requerimientos de su uso.

En general, las muestras de carbón obtenidas presentan características y propiedades adsorbentes similares o mejores a las de los carbones comerciales. El rendimiento máximo obtenido fue de 63.8 %, para el carbón preparado a 600 °C durante 30 minutos. El carbón que presentó mayor adsorción fue el preparado a 650°C durante 90 minutos, aunque para este, el rendimiento obtenido fue menor.

No se pueden comparar adecuadamente estas muestras de carbón con las hechas con anterioridad por investigadores guatemaltecos (33,34), sin embargo, estas fueron muy útiles, ya que fueron las primeras y sirvieron como base para realizar la presente investigación.

## XII CONCLUSIONES

1. Considero que la cáscara de la semilla del hule es una materia prima apropiada para la producción de carbón activado, no sólo por los resultados obtenidos en este trabajo, sino porque es un subproducto de la industria que extrae el aceite.
2. Por medio del equipo y los reactivos usados, así como la metodología empleada, fue posible obtener muestras de carbón activado con buenas características adsorbentes, pero en pequeñas cantidades.
3. El proceso de impregnación es de fundamental importancia en la producción del carbón activado, ya que mejora sensiblemente las características adsorbentes del mismo, en virtud de que la impregnación en función de los tiempos y temperaturas que se aplican es la responsable de aumentar el número y dimensión de los poros.
4. Entre las partículas de carbón activado, las de menor tamaño logran mayor capacidad de adsorción debido a la mayor porosidad de ellas y, por consiguiente, mayor area de contacto. Sin embargo, para determinadas formas de aplicación como tandas o lechos, el tamaño de la partícula es importante para lograr mejor adsorción en menor tiempo.
5. Al aumentar la temperatura y el tiempo de carbonización, aumenta el número de poros, y disminuye el rendimiento en la producción del carbón.

6. El uso de las isotermas de adsorción es conveniente para lograr información acerca de la capacidad de adsorción de los carbones y su forma de aplicación. Asimismo, proveen un medio sencillo de comparación entre los diferentes carbones.

### XIII RECOMENDACIONES

En vista que en Guatemala hay industrias que consumen carbón activado y que tienen que importarlo con la consiguiente fuga de divisas, así como que existe en el país materia prima nacional para la producción del mismo, tal como la cáscara de la semilla del hule, la cáscara de la semilla del corozo y otros materiales que son subproductos de la industria agropecuaria, es recomendable que se piense en instalar una planta productora de carbón activado.

Dadas las características específicas de las diferentes clases de carbón activado que usa la industria nacional, es recomendable que en un futuro trabajo se investiguen las cualidades de los carbones que se necesitan para poder producirlos.



## XIV. BIBLIOGRAFIA

1. Hassler, John (1967) Activated Carbon Leonard Hill Company, London.
2. Aveyard, R., Haydon, D.A. (1973) An Introduction to the Principles of Surface Chemistry, Cambridge University Press, Cambridge.
3. Adamson, A. (1967), Physical Chemistry of Surfaces, 2° Edition. Interscience Publishers, New York.
4. Flasar, M., Kustka, M., (1970), Manufacture of Active Carbon, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
5. Lewis, R. E., Gilliland, A.J., Cherton, D., Cadogan, E.R., (1950), Ind. Eng. Chem. 42, 1319.
6. Cheremisinoff, Paul., Ellerbusch, F., (1978), Carbon Adsorption Handbook, Ann Arbor Science Publishers Inc. Michigan.
7. Smisek, M., Milan, S., Cerny, A.T., Slavoj, R., (1970), Active Carbon: Manufacture, properties and applications. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
8. Morrison, R. (1978), The Chemical Physics of Surfaces 2° Edition, Plenum Press; New York.
9. Atkins, T., (1978), Physical Chemistry, W. H. Freeman and Company Inc. San Francisco.
10. Hutchins, R. A. (1980), Chem. Eng. 87 (4), 101.
11. Fornwalt, H.J., Hutchins, R.A. (1966) Chem. Eng. 73 (5) 132.

12. DeJohn, P.B., (1975), Chem. Eng. 82(4) 112.
13. Hutchins, R.A., (1973), Chem. Eng., 80 (8)245.
14. Yehaskel, A.,(1973), Activated Carbon: Manufacture and regeneration, Chemical Technology Review No. 117, Noyes Data Corporation, New Jersey.
15. Juhola, A.W., Wiig, O.P., (1949), J. Am. Chem. Soc. 71 (8) 2069.
16. Juhola, A.W., Wiig, O.P., (1949), J. Am. Chem. Soc. 71 (8) 2075.
18. Brunauer, G., Emmett, R.A., Teller, J. R., (1938), J. Am. Chem. Soc., 60, (2) 309.
19. Sheomaker, D. P., Garland, C.W., Steinfeld, J.I., Nibler, J.W., (1981), Experiments in Physical Chemistry, fourth edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
20. Harkins, W., Jura, G., (1944), J. Am. Chem. Soc. 66, (8) 1366.
21. Juhola, A. J., Report 400 S9, Nov. 1º, 1951.
22. Meade, G. (1967), Manual de Azucar de Caña, Montaner y Simon, S. A. Barcelona.
23. Fornwalt, A. J., Helbig, W. A. and Scheffler, G.A., (1963) British Chem. Eng. 8, (8) 546.
24. Holiday, A., Hardin, D., (1981), Chem. Eng. 88, (6) 198.
25. Kirk, R., Othmer, D. Scott, J., Standen, A., Enciclopedia de Tecnología Química Tomo No. 3, UTEHA, México.
26. Hutchins, R. (1980), Chem. Eng. 87, (4) 101.
27. Neretnieks, F. (1977), London Chemicals Engineers Symposium Series No. 54. London.

28. Darco, (1981), Carbones activados en polvo. Catálogo, U.S.A.
29. Clarimex, (1969), Carbones en polvo. Catálogo, México.
30. Calgón, (1982), Powder activated carbon for purification. Chemical division. U.S.A.
31. Witcario, (1970), Activated carbon for high performance adsorption. Catálogo.
32. Selle, Margarita, (1982), Evaluación química y nutricional de la almendra de semilla de hule. (tesis) Universidad del Valle de Guatemala.
33. United States Patent Office: Processes for making activated carbon. No. 2,567,468.
34. Ruiz, J. M., (1970), Obtención de carbón activado a partir de desechos agrícolas, (tesis), Universidad de San Carlos de Guatemala.
35. Santoveña, A.J., (1970), Posibilidad de utilizar los desechos de origen vegetal, disponibles en el país, para la producción de carbón adsorbente, (tesis), Universidad de San Carlos de Guatemala.
36. Liska, P.J., (1973), Ensayos sobre el empleo del bagazo del té de limón para la producción de carbón activado con cloruro de calcio en función de la concentración del activante, la temperatura y el tiempo de activación., (tesis), Universidad de San Carlos de Guatemala.
37. Hamm, E., (1981), Ensayos sobre el empleo del mesocarpio y endocarpio de la Orbignia cohune para la producción de carbón activado, (tesis), Universidad de San Carlos de Guatemala.
38. Calgón Corporation, (1980), Basic concepts of adsorption on activated carbon.
39. Breag, G.R., Harker, A.P., (1976), Rep. Trop. Prod. Inst. G.127.
40. Paddon, A.R., Harker, A.P., (1979), Rep. Trop. Prod. Inst. G.119.



## APENDICE A

Descripción de los métodos utilizados en la evaluación de las muestras de carbón.

1. Método ASTM D-3838-80 para la medida del pH

A 10 gramos de carbón se le agregan 100 ml de agua destilada hirviendo. Se pone en reflujo durante  $900 \pm 15$  segundos y filtra al vacío. Cuando la temperatura del filtrado es de  $20^{\circ}\text{C}$ , se mide el pH con un potenciómetro previamente calibrado.

2. Presencia de zinc soluble

A 10 gramos de carbón se agregan 100 ml de agua destilada y calientan a la temperatura de ebullición durante 15 minutos. Después de filtrar y enfriar, se añaden a la solución cinco gotas de ferrocianuro de potasio 0.2 M.

3. Presencia de cloruros en el agua de lavado

Se detectó la presencia de cloruros agregando tres gotas de nitrato de plata 1 M a 50 ml del agua de lavado.

4. Método ASTM D-2867-80 para determinar el contenido de humedad en el carbón

Se pesan alrededor de dos gramos de carbón en un pesafiltros previamente llevado a masa constante. Las muestras son secadas a  $145-150^{\circ}\text{C}$  hasta que llegan a masa constante. Luego se enfrían en un desecador y pesan con una precisión de 0.1 mg.

Cálculo:

$$\% \text{ Humedad} = \left[ \frac{(C-D)}{(C-B)} \right] \times 100$$

B es el peso del pesafiltros seco, C el peso del pesafiltros con la muestra original y D el peso del pesafiltros con la muestra seca.

5. Método ASTM D- 80 para la determinación del contenido total de cenizas en el carbón

En un crisol de porcelana, previamente tarado, se pesan con precisión de 0.1 mg. alrededor de cinco gramos de carbón seco. Se calienta el crisol y su contenido en una mufla a 650 °C. hasta obtener masa constante, enfría en un desecador y pesa.

Cálculo:

$$\% \text{ Cenizas} = \left[ \frac{(D-B)}{(C-B)} \right] \times 100$$

B es el peso del crisol seco, C el peso del crisol con la muestra original y D el peso del crisol con las cenizas.

6. Método ASTM D-2854-80 para medir la densidad aparente del carbón

Se pesa en una probeta de 10 ml una cantidad de carbón seco, cuyo volumen y masa puedan ser medidos con exactitud.

Cálculo:

$$\text{Densidad aparente} = \text{peso del carbón/volumen medido}$$

7. Método ASTM D-1510 para medir el número de yodo de los carbones

En un erlenmeyer se pesan con precisión de 0.1 mg. alrededor de 0.125 gramos de carbón seco y agregan 25 ml de una solución de yodo 0.047 N. Se agitan las muestras durante 30 minutos, y luego se centrifugan a una velocidad de 4000 rpm durante 30 minutos. Se decanta

y toman de ella 20 ml, los cuales son titulados con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio, usando almidon como indicador. El número de yodo se reporta como mg. de  $I_2$  adsorbidos por gramo de carbón.

8. Método ASTM D-3860-79 para determinar la capacidad adsortiva del carbón por la técnica de la isoterma

Número de Azul de Metileno

En Erlenmeyers de 125 ml se pesan con precision de 0.1 mg. cuatro masas distintas de carbón seco. A cada una se le agregan 50 ml de una solución que contiene un gramo de azul de metileno por litro. Se tapan los Erlenmeyers y agitan durante dos horas. Luego se centrifugan las suspensiones a 4000 rpm durante 30 minutos. Se decanta el sobrenadante y analiza en un espectrofotómetro UV-visible. Las lecturas de absorbancia se hacen a una longitud de onda de 641.2 nm. Se calculan las concentraciones de las soluciones usando la curva de calibración que aparece en el apéndice B.

Cálculos:

Cantidad de azul de metileno adsorbida,

$$X = CoV - CV$$

$Co$  es la concentración del azul de metileno antes del tratamiento con el carbón,  $C$  es la concentración del azul de metileno en la solución después del tratamiento con el carbón y  $V$  es el volumen de la muestra.

Se determina la cantidad de azul de metileno adsorbida por gramo de carbón, dividiendo  $X$  entre el peso del carbón utilizado. Se usa la ecuación No. 4 para encontrar  $(X/M)_{Co}$ , que representa la cantidad

de azul de metileno adsorbida cuando el carbón está en equilibrio con la solución.

#### Número de Eritrosina

En Erlenmeyers de 125 ml se pesan con precisión de 0.1 mg. cuatro masas de carbón seco. A cada una se le agregan 100 ml de una solución que contiene 0.2 gramos de eritrosina por litro. Se tapan los Erlenmeyers y agitan durante dos hora. Luego se centrifugan las suspensiones a 4000 rpm durante 30 minutos. Se decanta el sobrenadante y analiza en un espectrofotómetro UV-visible. Las lecturas de absorbancia se hacen a una longitud de onda de 531.0 nm. Se calculan las concentraciones de las soluciones usando la curva de calibración que aparece en el apéndice B.

#### Cálculos:

Los cálculos se realizan de la misma manera que para el número de azul de metileno.

APENDICE B

Curvas de calibración utilizadas en la dosificación del azul de metileno y la eritrosina

Las dosificaciones de azul de metileno y eritrosina no adsorbidas se hicieron por espectrofotometría UV-visible en un aparato Perkin Elmer Lamda 5 de doble haz. Al final del apéndice aparecen las gráficas de las curvas de calibración utilizadas; en ellas se presenta la lectura de absorbancia en función de la concentración, y también se presentan las líneas de regresión calculadas y utilizadas en las determinaciones.

Curva de calibración para dosificar el azul de metileno por espectroscopía UV-visible.

Puntos determinados con las soluciones patrón:

(Aparato Perkin Elmer Lamda 5, slit 0.2 nm, lecturas a 664.2 nm \*)

|  |                  |                 |                 |                 |                 |
|--|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Concentración<br>( $\mu\text{g. A. de metileno/l}$ ) | 1.416 $\pm$ .003 | .708 $\pm$ .003 | .354 $\pm$ .004 | .177 $\pm$ .005 | .071 $\pm$ .005 |
| Absorbancia  | 0.319 $\pm$ .001 | .156 $\pm$ .001 | .713 $\pm$ .001 | .030 $\pm$ .001 | .007 $\pm$ .001 |

\* La gráfica No. muestra el espectro de absorción del azul de metileno en la región desde 480 hasta 740 nm.

Línea de regresión calculada con las cantidades anteriores:

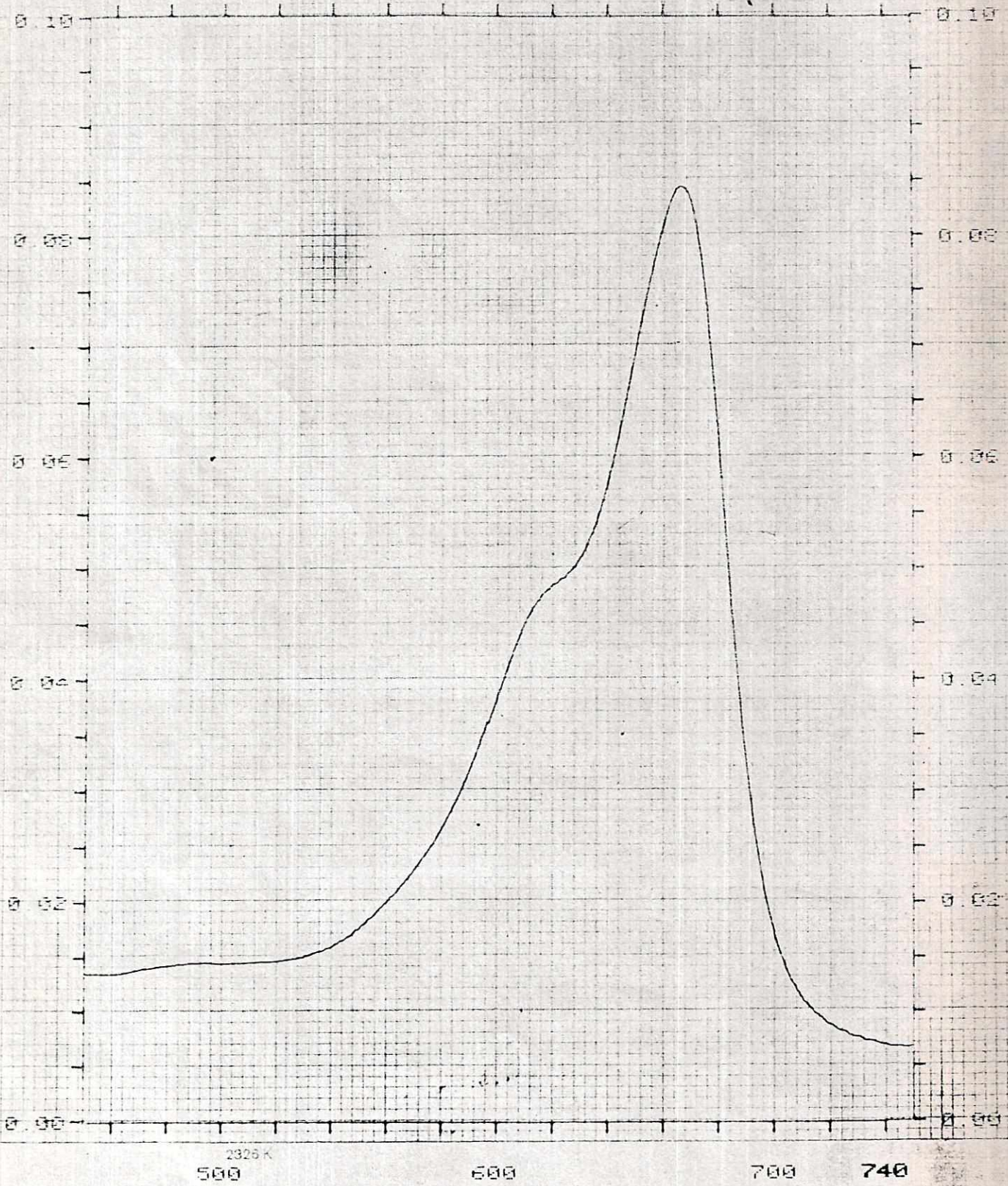
Abs. = 0.232 (conc.  $\mu\text{g. azul de metileno/l}$ )

$r = 0.9996$

106

Gráfica No.

Espectro de absorción del azul de metileno desde 480 hasta 740 nm.



2325 K

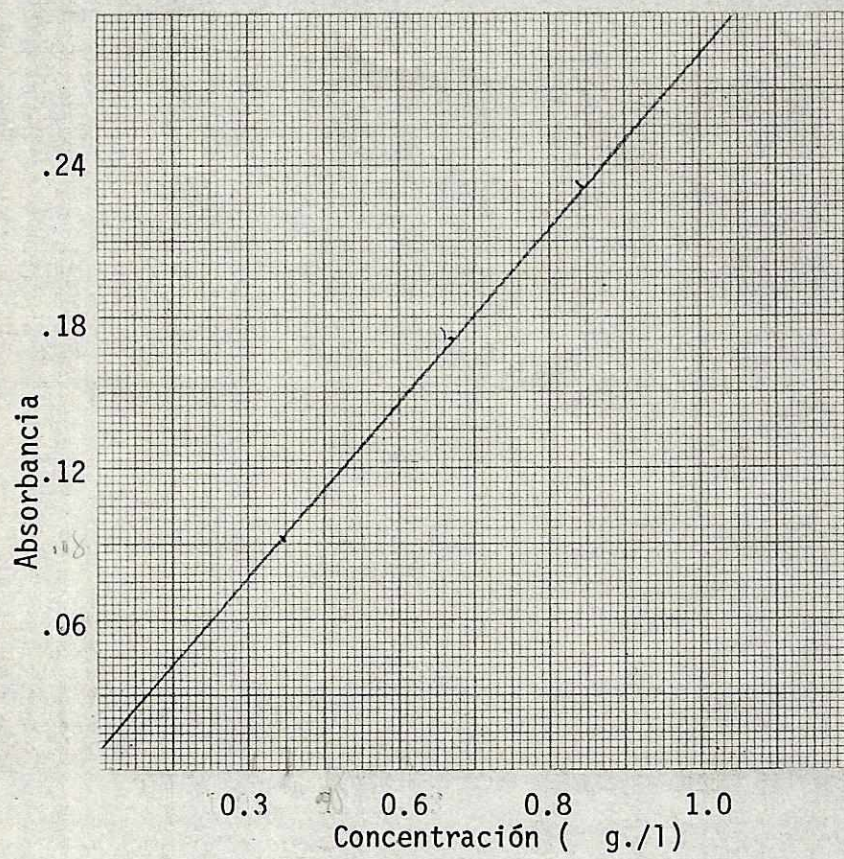
500

600

700

740

Curva de calibración para el azul de metileno.



Curva de calibración usada para dosificar la eritrosina por espectroscopía UV-visible.

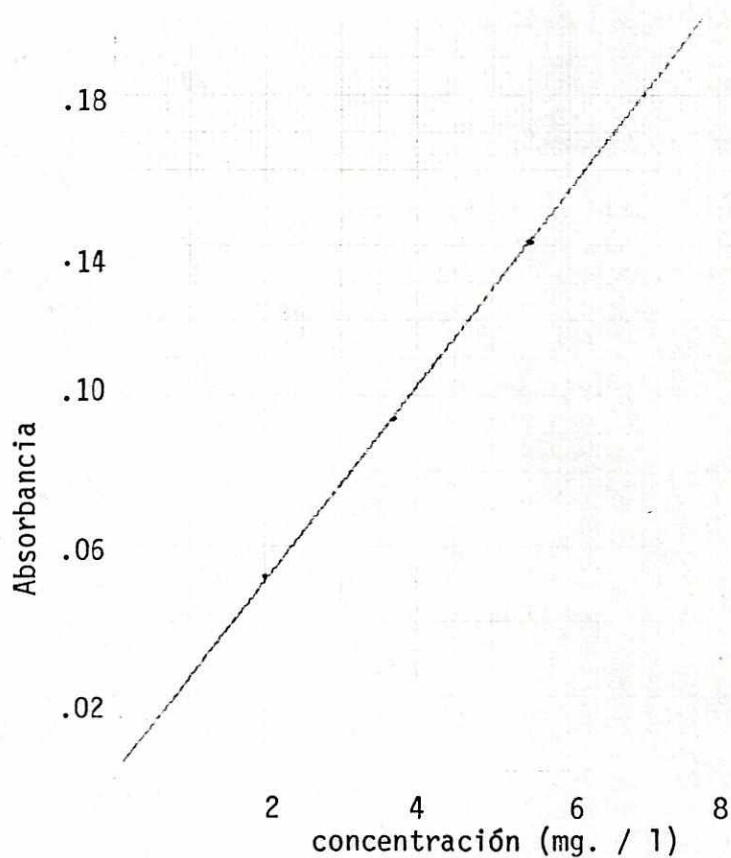
Puntos determinados con las soluciones patrón:

(aparato Perkin Elmer Lamda 5, slit 0.2 nm, lecturas a 531.0 nm.)

|                                     |            |            |            |            |           |
|-------------------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| Concentración<br>(mg. eritrosina/l) | 5.00±.03   | 10.00±.02  | 4.00±.04   | 1.60±.05   | 8.00±.02  |
| Absorbancia                         | 0.189±.001 | 0.365±.001 | 0.147±.001 | 0.059±.001 | .297±.001 |

Línea de regresión calculada con las cantidades anteriores:

$$\text{Absorbancia} = 36.557 \text{ (conc. mg. eritrosina/l.)} \quad r = 0.9997$$



APENDICE C

Estimación de incertidumbres en los valores determinados experimentalmente en el presente estudio.

En este trabajo, los rangos de incertidumbres que se presentan a la par de los valores determinados, fueron estimados por propagación de los errores al azar involucrados en la determinación correspondiente. Esto significa que conociendo la incertidumbre en cada una de las mediciones hechas a lo largo de la determinación de un valor, se calculó el efecto que esas incertidumbres pueden tener en el valor.

La estimación de las incertidumbres se hizo en base a lo siguiente (19): Un resultado que es función de varias variables  $F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , es obtenido experimentalmente al medir valores de esas variables  $x_i$  y relacionarlos por medio de la ley que define la función.

La incertidumbre en un resultado,  $\lambda F$ , es a su vez una función de la incertidumbre de las variables,  $\lambda x_i$ .

Por lo anterior, un resultado  $F$  determinado experimentalmente, se expresa como

$$F \pm \lambda F = f(x_1 \pm \lambda x_1, x_2 \pm \lambda x_2, \dots, x_n \pm \lambda x_n)$$

siendo

$$\lambda F = \left( \left| \frac{\partial F}{\partial x_1} \right|^2 (\lambda x_1)^2 + \left| \frac{\partial F}{\partial x_2} \right|^2 (\lambda x_2)^2 + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial x_n} \right|^2 (\lambda x_n)^2 \right)^{1/2}$$

$$F = \left( \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial F}{\partial x_i} \right|^2 (\lambda x_i)^2 \right)^{1/2}$$

Esta definición de la incertidumbre en  $F$ , toma en cuenta la alta probabilidad de que los errores al azar en las diferentes mediciones tienden a cancelarse unos con otros.

Resulta entonces lo siguiente, para algunos resultados F:

$$F = f(x,y) = x + y \quad \text{ó} \quad F = f(x,y) = x - y \quad \lambda F = [(\lambda x)^2 + (\lambda y)^2]^{1/2}$$

$$F = f(x,y) = xy$$

$$\lambda F = [F^2 \left( \frac{\lambda^2 x}{x^2} + \frac{\lambda^2 y}{y^2} \right)]^{1/2}$$

$$F = f(x,y) = x/y$$

En el caso de haber obtenido un resultado F, de la regresión lineal calculada para una curva de calibración, la incertidumbre en F se calculó por propagación de las incertidumbres de los valores medidos y de las incertidumbres de los parámetros de la línea de regresión.

Se calculó una línea de regresión con n puntos (x,y). Esta línea, con las desviaciones estándar correspondientes de los parámetros, es:

$$y = a_0 (\pm s_0) + a_1 (\pm s_1)x$$

$$\text{con } s_0 = \left[ \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2} \left( \frac{\sum x_i^2}{n[\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}]} \right) \right]^{1/2}$$

$$s_1 = \left[ \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-2)[\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}]} \right]^{1/2}$$

(según el Stat Pac 1 de la calculadora HP-65).

El resultado F se obtuvo a partir de un valor x calculado de la línea de regresión

$$x = (y - a_0) / a_1$$

La incertidumbre en este valor  $\hat{x}$ , se calculó por propagación de error de las desviaciones estándar  $a_0$ ,  $a_1$  y  $y$ . Se tomó como  $s_y$ , la desviación estándar de las distintas mediciones hechas para el mismo y; lo anterior da una incertidumbre

$$s_x = \frac{1}{a_1} [s_y^2 + s_0^2 + (\hat{x} s_1)^2]^{1/2}$$

Los rangos de incertidumbres que se presentan a la par de los resultados del número de yodo son límites de confiabilidad al 95% (19).

$$(95\% \text{ confianza}) = \frac{t S}{N}$$