



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**Escuela Nacional de Estudios Profesionales  
IZTACALA**

**“ USO DEL LIRIO ACUATICO (Eichhornia crassipes  
( Mart. ) Solms-Laubach ) COMO CARBON  
ACTIVADO EN UN FILTRO DE AGUA DE  
TIPO DOMESTICO.”**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**B I O L O G O**  
P R E S E N T A :  
**ERNESTO URIBE GOMEZ**

**DIRECTOR DE TESIS : M. EN C. ERIC GUTIERREZ LOPEZ**



**LOS REYES, IZTACALA, 1995**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

400282



61060



**Agradecimientos:**

***A Él, por la vida y la constante sorpresa de saber que existo...***

***A mi madre, por estar aquí, a mi padre, en su memoria, a mis hermanos por ser como son y a la familia sin la cual no seríamos...***

***A mis amigos en todos los rincones del mundo...***

***A los seres solitarios que, como yo, sufren, lloran, rien y se revelan cada día con la única esperanza de romper cadenas, acabar prejuicios y lograr una sonrisa permanente en la cara y el corazón...***

***A la ciencia, que es a la que nos debemos y es la que debemos hacer...***

***A los cuates, a la banda, con los que compartí muchas aventuras, desvelos y que siempre han estado junto a mí, y que por ser muchos no escribo sus nombres para no omitir a nadie...***

***A Ana Laura, por ser como es, por su ánimo, impulso avanzando siempre adelante ...***

***A mi equipo de trabajo del IMTA, sin los cuales no hubiera podido seguir adelante, especialmente a Eric, Rubén, Eduardo, Alfredo, Marco, Ulises, María Luisa ...***

***A Tania, a MaryCh, por los momentos que he pasado junto ha ustedes...***

***A toda la gente que me ha hecho daño, porque me han dado las fuerzas para levantarme y luchar cada día...***

***A las latas de atún, al café, las gastritis, vista cansada y otras monerías sin las cuales no hubiera sobrevivido...***

***A los niños del siglo XXI, que seguramente entenderán mejor... GRACIAS***

***P.D. Ah! y por supuesto, ...a la Biología, por la que soy lo que soy.***

## INDICE

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN   | vi |
| INTRODUCCION  | 1  |
| OBJETIVOS   | 2  |
| ANTECEDENTES  | 3  |
| MATERIAL Y METODOS  | 9  |
| Obtención del material adsorbente.                                      | 9  |
| Tezontle.   | 10 |
| Carbón activado.  | 12 |
| Pruebas de adsorción estática.  | 12 |
| Capacidad adsorbente del carbón activado en polvo de lirio (CAP-lirio). | 12 |
| Tiempo de equilibrio.   | 15 |
| Obtención de las isothermas de adsorción.                               | 16 |
| Construcción y montaje del prototipo filtrante.                         | 17 |
| Construcción.   | 17 |
| Montaje.  | 19 |
| Prueba de adsorción dinámica.   | 19 |
| Desarrollo de la prueba de adsorción dinámica.                          | 21 |
| Evaluación de eficiencia y remoción de los prototipos filtrantes        | 22 |
| RESULTADOS Y DISCUSION  | 24 |
| a) Naturaleza del material a carbonizar                                 | 24 |
| b) Temperatura y tiempo de carbonización                                | 24 |
| c) Composición del activante  | 28 |
| Adsorción estática  | 31 |
| Adsorción dinámica  | 40 |
| Factibilidad económica  | 58 |
| CONCLUSIONES  | 62 |
| RECOMENDACIONES   | 64 |
| NOMENCLATURA  | 65 |
| BIBLIOGRAFIA  | 66 |

## RESUMEN

El lirio acuático es un tipo de planta que puede ocasionar problemas de índole económico, social, sanitario e hidráulico cuando alcanza niveles de maleza. Por ende, este trabajo se enfocó a dar otra alternativa de uso y aprovechamiento de esta planta, empleandola como materia prima del carbón activado.

El lirio acuático se sometió a una carbonización y activación. A 850 °C, con una proporción de activante de 0.1 % en un lapso de 20 min se obtuvo un carbón que adsorbe 87.7 mg azul de metileno por gramo de carbón y un área específica de 180 m<sup>2</sup> por gramo. El carbón obtenido fue de calidad intermedia con respecto a los carbones Merk y Clarimex. La transformación de lirio a carbón activado mostró un rendimiento del 12 % con respecto a la base seca y del 0.54 % a la base fresca del lirio acuático.

La caracterización del carbón activado en las pruebas de adsorción estática mostró un tipo de adsorción física, el cual ocurrió en multicapas, significando que conforme aumenta la concentración del adsorbato aumenta la adsorción del adsorbente.

Al aplicar el carbón activado como lecho filtrante en la prueba de adsorción dinámica se evaluó una eficiencia del  $96.85 \pm 2.45$  % para color y de  $98.12 \pm 0.42$  % para turbiedad, superando al tezontle en tales características.

Al combinar ambos materiales como lechos adsorbentes se notó una eficiencia mayor, esto debido a que se encontró un punto de ruptura de adsorción para color a los 36 L y de turbiedad a 41.8 L de afluente tratado, pero esto no indica una saturación de la columna. Dicha saturación se evidenció a 83.5 L para color y 81 L para turbiedad. Como complemento se obtuvo que no se necesita una columna de 30 cm para tener una buena eficiencia, sino que una de 27 cm tiende a utilizar todo el lecho.

Por último se evaluó la factibilidad económica del carbón activado utilizando como materia prima el lirio acuático resultando que el kilogramo tiene un costo de N\$ 31.70 sin considerar el proceso de fabricación, no obstante el 92 % del costo es resultado de la extracción y transporte, por lo tanto resulta atractivo para su uso como lecho adsorbente en filtro de agua de tipo doméstico.

## INTRODUCCION

La humanidad cuenta con una amplia variedad de recursos naturales que son condición imprescindible de su existencia y por ende elementos fundamentales de su desarrollo.

Es así que los recursos hídricos epicontinentales se constituyen como una base significativa del sistema llamado biosfera. El éxito de los programas de explotación y administración de los recursos acuáticos depende en gran medida del manejo eficiente y apropiado del agua como un ambiente productivo. Pero el efecto ambiental antropogénico al cual han sido sometidos dichos sistemas ha ocasionado diversas alteraciones, con graves secuelas tanto en la flora como en la fauna acuática. Una de estas consecuencias es la presencia de organismos que abundan y modifican las características del recurso.

Uno de estos organismos que está afectando en gran medida a dichos sistemas es el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) que es considerado como una "maleza", debido a que es una planta que crece en forma desmedida y en lugares donde no es necesaria, alterando su entorno ecológico (Penfound y Earle, 1948; De la Compa y Guzmán, 1963; Chapa y Gaudiana, 1976; Holm, 1977; Niño y Lot, 1983; Contreras *et al.*, 1982b y 1983; Sculthorpe, 1985).

En la actualidad, dada la imposibilidad de erradicar esta planta, se adopta la postura de considerar el problema del lirio acuático no bajo el concepto totalitario de plaga, sino como un recurso natural renovable de un elevado potencial latente, el cual habrá que utilizar y administrar en el futuro (Gutiérrez, 1991). *Eichhornia crassipes* puede considerarse entonces como una fuente de materia prima para la extracción de productos útiles en el campo industrial, biomédico o agrícola. La extracción continua y controlada del lirio contribuirá a lograr una estabilidad ecológica.

Bajo el concepto de utilización, se ha empleado a esta planta para obtener fertilizantes (mejoradores de suelos), forrajes (para equiparar las deficiencias agrícolas en la época de estiaje), fuentes de energía (biogas), principios activos, así como para la remoción de metales pesados y/o minerales de aguas residuales, entre otros.

El empleo del lirio acuático como carbón activado tiene dos propósitos, primero, contribuir a la solución de la problemática de la sobre explotación maderera y segundo, dar alternativas que sustenten el control de la maleza por extracción (Bolaños, 1990).

La utilización del carbón activado se lleva a cabo en procesos como la refinación del azúcar, de aceites, vinos y licores, además de la purificación del aire y de aguas municipales e industriales removiendo en forma general olores, colores, sabores,

compuestos orgánicos, etc. Para este estudio, resulta importante el tratamiento de agua, dados los problemas de contaminación de la misma, reflejados en la calidad con la que se hace llegar al usuario ( Valdéz, 1981; Gallina, 1984; Organización Panamericana de la Salud (OPS), 1985; Leyva *et al.*, 1990).

El agua para consumo humano tiene diversos grados de tratamiento dependiendo de la calidad y la fuente de abastecimiento. Empero, a pesar del tratamiento que recibe, existe la posibilidad de que el agua potable pueda deteriorarse (OPS, *op. cit.*). Es frecuente encontrar en las poblaciones filtros de tipo doméstico, con la finalidad de eliminar los agentes contaminantes que pudiera captar el agua en el trayecto de la fuente hasta el punto final de consumo (Instituto Nacional del Consumidor (INCO), 1992).

Lo expuesto motivó a desarrollar este estudio, con el propósito de contribuir al mejoramiento de la calidad del agua de uso doméstico al utilizar filtros a base de carbón activado (elaborado a partir del lirio acuático) y de tezontle, los cuales pueden ser una opción para reducir los problemas ocasionados por dicha planta permitiendo abatir de alguna manera la tala inmoderada de los bosques.

## **OBJETIVOS**

- Elaborar carbón activado, utilizando como materia prima lirio acuático.
- Realizar la comparación del carbón activado obtenido del lirio acuático con carbones de tipo comercial.
- Construir un prototipo de filtración de agua de uso doméstico.
- Evaluar la eficiencia del prototipo filtrante para obtener un tipo de agua que sea aceptablemente estética.
- Estimar la factibilidad económica del proceso de fabricación del carbón activado.

## ANTECEDENTES

La proliferación desmedida del lirio acuático, ocasiona problemas de distinta índole y magnitud económica, ecológica y sanitaria. Del primer tipo, cabe citar a aquellos relacionados en la operación de obras hidráulicas (tamponamiento en los canales de riego, pérdida de agua por evapotranspiración), así como impedir el desarrollo de actividades recreativas y deportivas; en el aspecto ecológico, es evidente el efecto de esta planta, debido a que origina condiciones de estancamiento del agua, atribuido a la acumulación de grandes cantidades de sedimentos y de materia orgánica, ocasionando una reducción en la productividad primaria, lo que favorece el desarrollo de pantanos y/o ciénagas que llegan a desaparecer total o parcialmente a un cuerpo de agua. Por último, en el ámbito sanitario, el lirio acuático es hospedero de organismos vectores de enfermedades como la malaria, la encefalitis y la esquistosomiasis (Chapa y Gaudiana, 1976; Escobar, 1977; Hutchinson, 1975; Sculthorpe, 1985 y Barrett, 1989).

Por la importancia del lirio, se ha producido en todo el mundo una cantidad considerable de bibliografía. Se destacan los trabajos de recopilación hechos por Pieterse (1974) y Gopal (1987).

*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach, comúnmente llamado lirio acuático, es una monocotiledónea, perenne, herbácea y flotante que pertenece a la familia Pontederiaceae (Sánchez, 1980 y Cornell & Cornell, 1985).

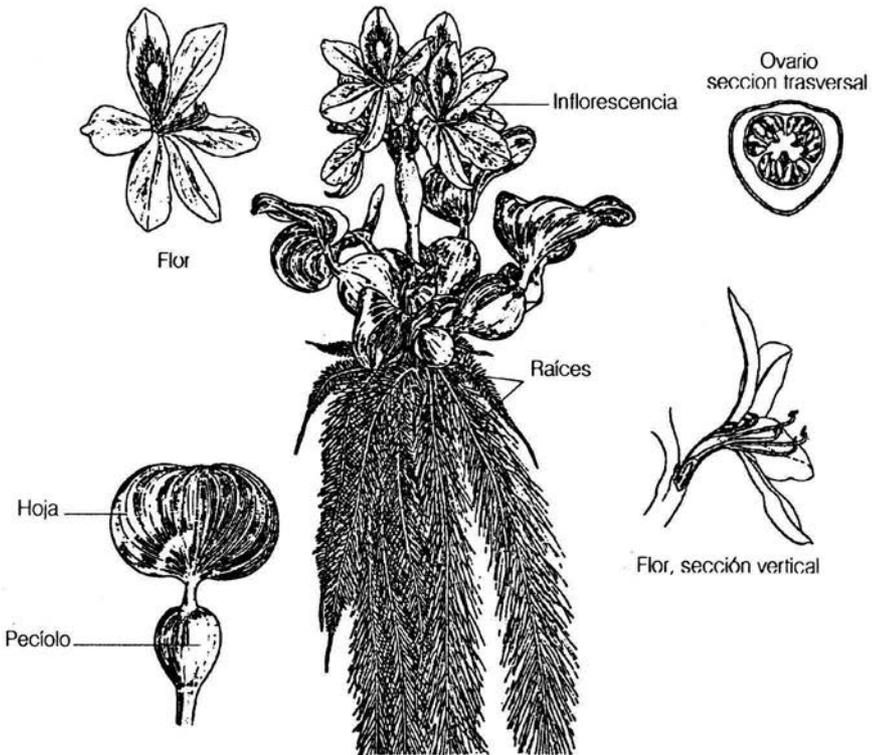
En estado adulto la planta de lirio se constituye de raíces, rizoma, estolones, pecíolos, hojas, inflorescencias, frutos y semillas (Penfound y Earle, 1948) (Figura 1).

El lirio acuático se puede reproducir tanto sexual como asexualmente (Bock, 1969; Barrett, 1977, 1978a, 1978b, 1980a, 1980b, 1985 y 1989; Lallana, 1980, 1981 y 1987).

Gutiérrez en 1991, aplicó los términos de control y aprovechamiento en relación al lirio acuático, percibiendo una naturaleza dual. De aquí, que todo control y aprovechamiento racional requiere conocer funcionalmente las interrelaciones entre los diversos elementos de los sistemas biológicos, siendo éstas el inicio de tácticas y estrategias de operación.

El principal objetivo en un programa de control para la maleza acuática es el fomentar un balance de ésta y su entorno para mantener la estructura biológica de los sistemas de aguas epicontinentales. El equilibrio debe ser alcanzado tomando en cuenta factores ecológicos, económicos y recreacionales. Los métodos de control se agrupan en: químicos (aplicación de herbicidas), físicos (remoción y/o trituración por métodos mecánicos y manuales) y biológicos (utilizando organismos vivos como controladores) (De la Compa y Guzmán, 1963; De La Loma, 1977; Escobar, 1977; Bonilla, 1985; Romero, 1989; El Bronco, 1991; SORE, 1992).

Fig 1. Morfología del lirio acuático  
(*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms)



Fuente: Quiroz y Miranda, 1992.

Para un país como México, el control del lirio acuático debería contemplar programas paralelos de aprovechamiento de la materia orgánica obtenida.

En torno a la utilización de esta planta se han tratado de obtener diversos productos. Por mencionar algunos, se ha aprovechado al lirio acuático para reducir la contaminación, debido a que actúa como filtro natural captando grandes cantidades de arsénico, plomo, mercurio y cadmio (Jensen, 1988).

Como recurso alimenticio representa una fuente de proteínas útil para la alimentación animal al usarlo como forraje o como harina (Escamilla, 1988; Monsalvo, 1988). Ha sido utilizado en la agricultura como abono verde en los sistemas de chinampas (Quiroz, Miranda y Lot, 1982; Esquinca, *et al.*, 1988; Carlos, 1989) y para la elaboración de compostas (Delgado, 1982).

Se ha buscado utilizarlo en la elaboración de papel y como sustrato en la producción de biogas (Widganto, *et al.*, 1983; Monroy, Ramirez y Luna 1988). González (1989), extrajo compuestos fitoquímicos como taninos, cloruro de amonio, cianidina y pelargonidina.

Otro tipo de producto hecho a partir de lirio acuático es el carbón activado (CA), que fue obtenido por Carrillo en 1976.

El CA se puede obtener de varias fuentes de materia orgánica como son: cáscara de café, cachaza, cáscara de coco, maguey, dátil, huesos, etc. (Cetina, 1973; Carrillo, *op. cit.*; Cordero, 1979; Carrillo, Chao y Cetina, 1979; León, 1981; Jiménez, 1988).

La fabricación del CA consiste en la carbonización de la materia prima bajo condiciones apropiadas, después de la cual el carbón resultante es frecuentemente sujeto a oxidación en un ambiente controlado. La carbonización general se realiza en ausencia de aire utilizando activantes como vapor de agua,  $ZnCl_2$ ,  $H_3PO_4$ , S, CaCl,  $Ca_3PO_4$ ,  $Ca(OH)_2$ , etc. ayudados de procesos térmicos. Una activación adecuada origina una gran cantidad de poros (Cordero. *op. cit.*).

El CA se clasifica por su procedencia en carbones de origen animal (se extrae de tejidos animales), CA de origen vegetal (utiliza en forma generalizada a la madera) y de origen mineral (carbón fósil) (Valdez, 1981).

DEGREMONT (1971), establece que en términos de granulometría existen dos tipos de CA: el carbón activado granular (CAG) que pasa por la malla No. 8 (2.38 mm) y es retenido por la malla No. 50 (0.42 mm) y el carbón activado en polvo (CAP) que pasa la malla No. 200 (0.0074 mm).

Eskell (1979), Gallina (1984) y Mc. Guire (1991), anotan que el CAP ha sido mejor aceptado en tratamientos discontinuos (la sustancia a ser tratada se mezcla con el

CAP y se separan posteriormente por filtración). Con el CAG, tanto gas como líquido a ser tratados, son pasados continuamente a través de un lecho de carbón (operación continua). La elección del tipo de carbón dependerá de la situación individual de cada caso.

El poder adsorbente del CA se fundamenta en la teoría de la adsorción. Para Treybal (1968), DEGREMONT (*op. cit.*) y López (1986), este principio logra la separación de sustancias activas de otras que se quiere utilizar y obtener solas (operaciones de transferencia de masa).

Cordero (1979), describe al proceso de adsorción conformado por un ADSORBATO (moléculas que se adsorben) y el ADSORBENTE (sólido que lleva a cabo la adsorción).

Gallina (*op. cit.*), establece que para lograr la adsorción es necesario que exista una gran área superficial, debido a que sólo una pequeña cantidad de moléculas se adhieren a cada metro cuadrado de superficie. Una sustancia porosa provee una mayor área específica.

Para Adamson (1960) y Weber (1979), existen tres tipos de adsorción: adsorción física (resultado de las fuerzas de Van der Waals), quimiosorción (se forman enlaces fuertes e irreversibles entre el adsorbato y los sitios activos del adsorbente) y la adsorción por intercambio iónico (se produce por fuerzas de atracción eléctrica en los sitios activos del adsorbente).

Los usos del CA son múltiples, se sabe que el CA es utilizado en la refinación del azúcar cruda o morena; en la industria aceitera y de grasas, se aplica en la industria vitivinícola, el CA también se usa en el tratamiento de aguas residuales, en la industria textil, en la industria alimentaria etc. El CA es importante en la purificación de éstos y otros productos (Carrillo, *op. cit.*; Cordero, *op. cit.*; Valdéz *op. cit.*).

De éstos y otros usos tiene especial interés el que se refiere a la potabilización y reuso del agua. El CA es el método más empleado debido a que una sobredosis no ocasiona daño y lo que es más importante remueve con eficiencia a ciertos contaminantes mejorando la presentación y aceptabilidad del producto (Valdéz, *idem.*). Hoy en día el CA no sólo se utiliza en procesos de purificación a gran escala, sino que se ha empleado en filtros de tipo doméstico para reducir el deterioro del agua potable durante la distribución y el abastecimiento en las zonas urbanas o la contaminación de los mantos fráticos que se explotan por pozos en las zonas rurales. Por tal causa es frecuente encontrar en los hogares filtros comerciales que mejoren la calidad del agua potable (INCO, 1992).

El filtrado es la remoción de sólidos al pasar un flujo de agua u otro líquido a través de un medio poroso eliminando de esta manera a los contaminantes que produzcan colores, olores sabores y/o que sean tóxicos o mutagénicos (Sandoval y Castellanos,

1990; Cuevas y Corona, 1990). Para tal función el filtro debe reunir ciertas características.

Al analizar y comparar los filtros comerciales y experimentales, se puede hacer una generalización en cuanto a sus partes, como es un lecho filtrante (este material va a ser el encargado de adsorber las impurezas). El lecho filtrante está compuesto de un principio activo y uno inerte. Un contenedor (básicamente un envase en el que se va a depositar al lecho filtrante y al material de separación, en el caso que se presente); un sistema hidráulico (estructuras que alimentan o desalojan el agua en el filtro) y un material de retención o separación (serie de mallas que compacten y mantengan en su lugar al lecho (APHA *et al.*, 1985; Sarmiento, 1986; Instituto Nacional del Consumidor (INCO), *op. cit.*).

El lecho filtrante puede entonces dividirse en un lecho activo (cuando se requiere) y uno inerte. En el lecho filtrante activo, el principio activo tiene como función la de ser bactericida o germicida. Dentro de éstos se mencionan algunos iones metálicos, el yodo, alcalis o ácidos, entre otros (American Water Work Association (AWWA), 1971). El principio inerte como función retener las partículas en suspensión, de acuerdo a los filtros comerciales está constituido de materiales como la cerámica, la tierra de diatomitas, el cuarzo granular, el CA, etcétera.

Un adsorbente no convencional que se ha probado como principio inerte es el tezontle, el cual es fácil de encontrar en abundancia en determinadas regiones (Leet y Judson, 1976; Stokes, 1977).

Los tezontles son basaltos o rocas ígneas las cuales pueden ser alcalinas, calco-alcalinas (rocas ácidas o intermedias) y teolíticas. Su composición aproximada es de:

|                                |                 |           |
|--------------------------------|-----------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | aproximadamente | 43-50%    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | aproximadamente | 15%       |
| Oxidos de Ca y Mg              |                 | 20-30%    |
| Otros oxidos (Fe, Mn, etc.)    |                 | el resto. |

Sokoloff y Lorenzo en 1985, mencionan al tezontle como una roca porosa que posee una elevada área de contacto, con colores dominantes de rojo oscuro, rojo negro y negro y su peso varía entre 1400 y 1700 Kg/m<sup>2</sup>. El tezontle puede ser clasificado por su coloración en:

|                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| Tezontle rojo beneficiado.....  | 1.4 a 1.5 mg Fe <sub>2</sub> O |
| Tezontle negro beneficiado..... | 0.0 mg Fe <sub>2</sub> O.      |

Sarmiento (*op. cit.*) y López (*op. cit.*), han desarrollado una tecnología que utiliza al tezontle como un material adsorbente natural no convencional en filtros que remueven metales pesados en aguas residuales.

De acuerdo al INCO (*op. cit.*), existen actualmente en el mercado tres tipos de filtros que brindan a los consumidores la posibilidad de potabilizar el líquido:

1.-Filtros purificadores de agua que son dispositivos equipados con una bujía de cerámica, éstos poseen cartuchos reemplazables de acción bactericida que retienen partículas muy finas. Algunos están elaborados con CA que sirve para evitar sabores y olores desagradables en el agua.

2.-Filtros de agua que a diferencia de los anteriores sólo retienen partículas en suspensión, pero no eliminan bacterias por no presentar un lecho con principio activo, siendo recomendables para casas habitación que no poseen cisterna o tinaco.

3.-Purificadores de agua con luz ultravioleta, que se emplean sólo para eliminar bacterias.

Esto lo demuestran trabajos como el de Rosales, *et al.*(1991), Cuevas y Corona (*op. cit.*) y SEDUE (1991).

## **MATERIAL Y METODOS**

La parte experimental constó de cuatro fases: La primera fue la obtención del material que se utilizó como lecho filtrante (carbón activado (CA) y tezontle). La segunda se enfocó a evaluar la adsorción estática para el carbón activado en polvo (CAP); en la tercera fase se hizo la construcción y montaje de un prototipo filtrante de agua tipo doméstico y en la última parte se evaluó la eficiencia del prototipo filtrante bajo las pruebas de adsorción dinámica. Así mismo, en una fase posterior se consideró la evaluación económica de la producción del CA.

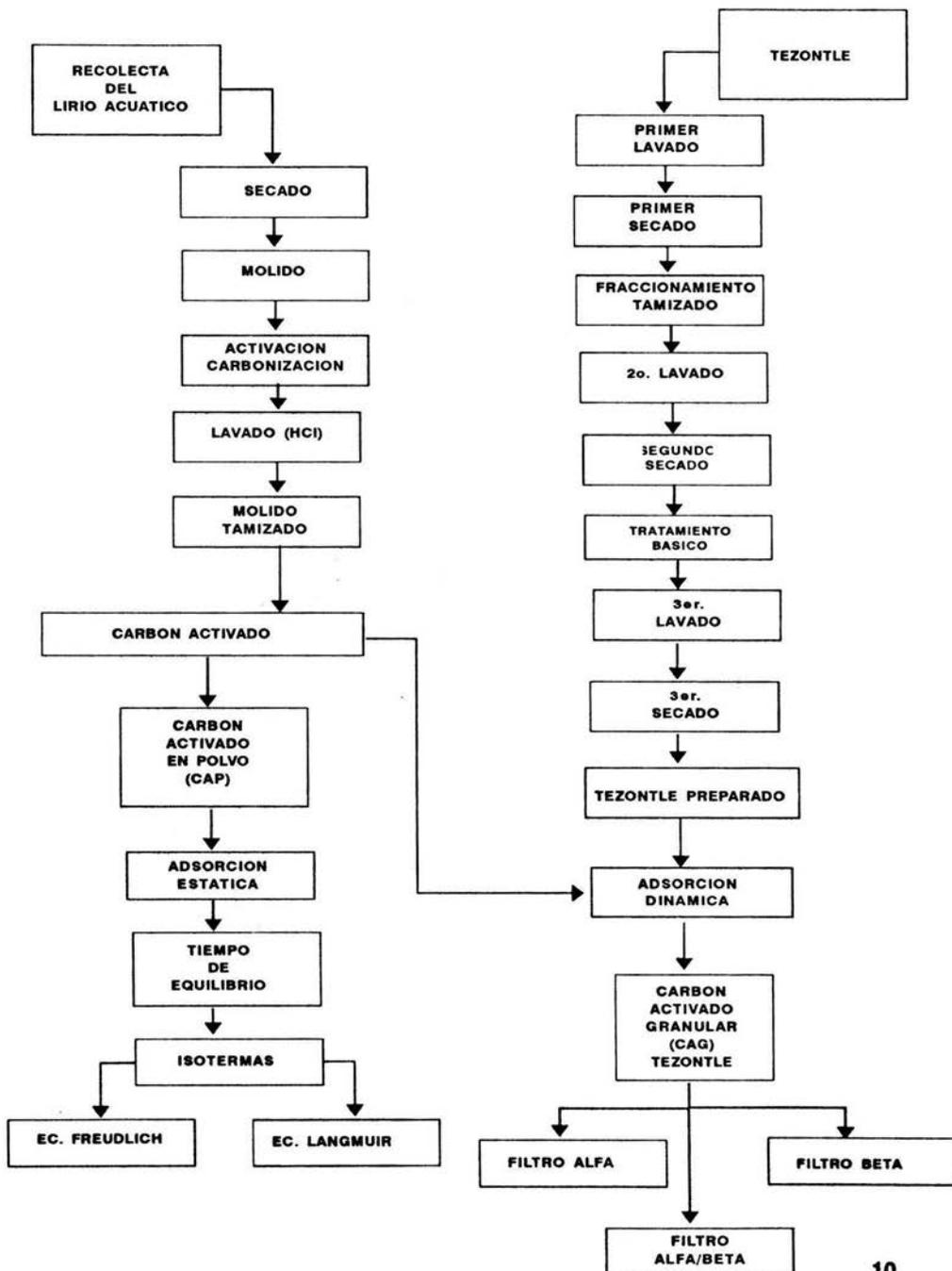
### **Obtención del material adsorbente.**

#### Tezontle

Se usó tezontle natural fraccionado y lavado para evitar impurezas como polvo y materia seca, según Sarmiento (1985) y López (1986) (Figura 2).

- a) Primer lavado. Este se efectuó con agua desionizada para eliminar cualquier material extraño que estuviese contenido en la superficie (polvo, y otros materiales).
- b) Primer secado. Para eliminar el agua del primer lavado, se extendió en charolas y se secó en una estufa a 100°C durante 24 h.
- c) Fraccionamiento. Esta acción se llevó a cabo mediante la trituración en mortero de porcelana para obtener diámetros de partículas más pequeñas y aumentar la superficie de adsorción del tezontle.
- d) Tamizado. Después de la trituración se tamizó sobre mallas de alambre con un ámbito de apertura de 0.84 mm-0.42 mm.
- e) Segundo lavado. Con el fin de retirar las partículas adheridas a la superficie adsorbente durante el fraccionamiento se les dio a éstas un segundo lavado (por cada kilogramo de partículas de tezontle se usaron tres litros de agua desionizada).
- f) Segundo secado. ver b.
- g) Tratamiento básico. A las partículas del tezontle se les sometió a una solución de hidróxido de sodio (NaOH 0.2N, 1.5 L/kg de tezontle) hasta cubrirlas bien, se agitó y dejó reposar por 24 h.
- h) Tercer lavado. Las partículas con NaOH se decantaron y lavaron con agua desionizada hasta que el agua de lavado era clara y tenía pH de 7, determinado con potenciómetro.
- i) Tercer secado. ver b.

Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención y prueba de los adsorbentes.



## Carbón activado

El diagrama de bloques de la Figura 2 muestra el proceso que se desarrolló para poder obtener carbón activado a partir de lirio acuático.

El proceso que se llevó a cabo es una modificación del seguido por Carrillo (1976).

1) Obtención del lirio acuático. Se recolectaron 300 kg de lirio acuático de la laguna de Zumpango, Edo. de Méx. determinándose el peso húmedo.

2) Secado. Para disminuir el tiempo de estancia en la etapa de carbonización y activación se efectuó el secado en una estufa a 120°C o bien extendiéndolo al sol por un período mínimo de 48 hr. obteniéndose así el peso seco (Carrillo, *op. cit.*)

3) Molido de lirio acuático seco. Con el propósito de uniformizar el tamaño de las partículas así como el de facilitar su manejo, se efectuó el molido, para lo cual se usó un molino Thomas-Wiley Intermediate de aspas.

4) Carbonización y Activación. Se mezcló el lirio acuático molido y seco con el activante que en este caso fue hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) variando la proporción. Ambos se depositaron en charolas de acero inoxidable. Como medio de calentamiento directo se empleó una mufla Furmatrol de Sybrol Termolyne Co. de  $1500 \pm 5$  °C.

5) Tratamiento para eliminar las impurezas. Debido a la presencia de residuos inorgánicos de la materia prima del activante y de impurezas por desgaste de los contenedores empleados, fue necesario adicionar una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 10 %, posteriormente se hirvió y lavó hasta un pH cercano a la neutralidad con agua desionizada.

6) Secado del carbón. Se realizó en una estufa a 120 °C durante 4 h. con lo que se logró reducir el contenido de agua del proceso de lavado y dejar libres los poros para una buena adsorción.

7) Molido y tamizado. El carbón ya seco se pasó por una serie de tamices para seleccionarlo, considerándose como carbón activado granular (CAG) al que sobrepasa la malla No. 8 (2.38 mm) y es retenido por la criba No. 50 (0.42 mm) y como carbón activado en polvo (CAP) al que pasa el tamaño de malla 200 (0.074mm). Para el presente estudio se empleó el CAG en procesos continuos por la ventaja de una buena operación, con un tamaño de partícula de 0.59 mm x 0.42 y al CAP en la adsorción estática.

### Pruebas de adsorción estática

Esta etapa consistió de una serie de pruebas para evaluar la capacidad adsorbente, el tiempo de equilibrio y las isothermas de adsorción del carbón activado en polvo (CAP) obtenido del lirio acuático.

#### Capacidad adsorbente del carbón activado en polvo.

La medición de la capacidad adsorbente se hizo por el método del azul de metileno, que consiste en decolorar una cierta cantidad de solución y después determinar la cantidad adsorbida por el carbón.

El procedimiento fue: Pesar 0.6 g de azul de metileno y ponerlos en un matraz aforado de 1000 mL, agregando 50 mL de ácido acético y aforando con agua destilada, así se obtuvo una concentración de  $6 \times 10^{-4}$  g/mL. De ésta solución se tomó 1 mL y se depositó en un matraz aforado de 100 mL hasta el aforo, obteniéndose una concentración de  $6 \times 10^{-6}$  g/mL. De ésta última solución se tomaron 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 mL colocándose cada uno en tubos de ensaye diferentes, aforándose con agua destilada hasta 10 mL. Se obtuvieron 10 soluciones de diferente concentración cuya adsorción se midió en un espectrofotómetro BAUSCH-LUMB modelo SPECTRONIC-20 a 676 nm.

La adsorción se calculó a partir de una curva de calibración, la cual fué ajustada por medio del método de mínimos cuadrados a una línea recta, y proporcionó la ordenada al origen, la pendiente y el coeficiente de correlación (Sarmiento, 1985 y Cordero 1979) (Ecuación 1, Figura 3).

$$C = m A + b \quad \dots( 1 )$$

Donde

C : concentración = g/mL

A : Adsorbancia = nm

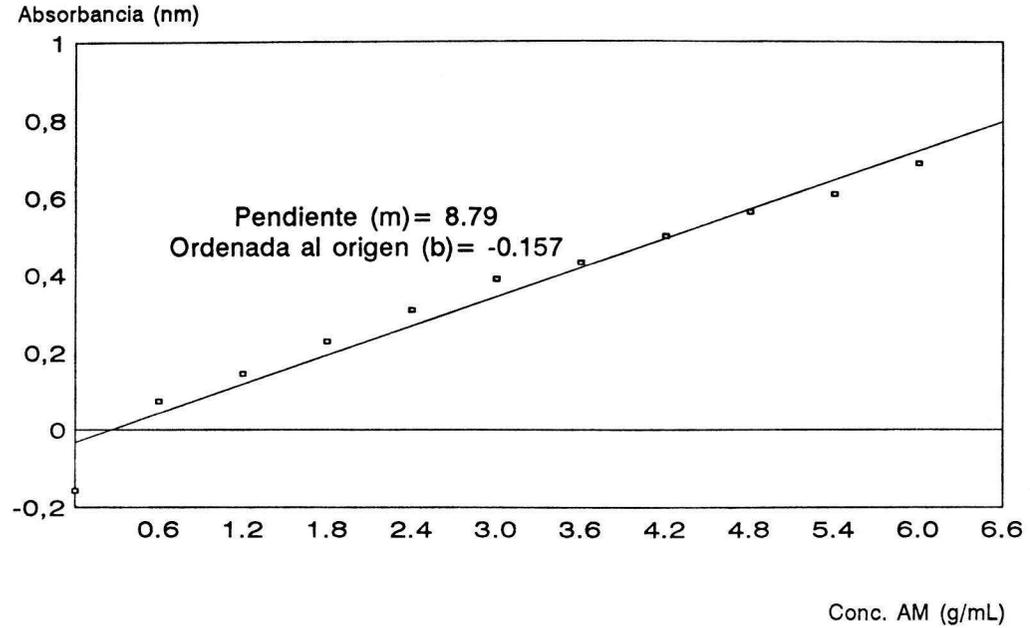
m : pendiente = 8.79

b : ordenada al origen = -0.157

Sustituyendo

$$C = (8.79 A - 0.157) \times 10^{-6} \quad \dots( 2 )$$

Figura 3. Curva de calibración del azul de metileno utilizada para las pruebas de adsorción del carbon activado en la adsorción estática.



La concentración remanente de una solución después de la prueba de adsorción de azul de metileno, se determinó de la forma siguiente: se pesó (P) una muestra de carbón activado y se colocó en un vaso de precipitado de 100 mL, se agregó un volumen (V) de la solución de azul de metileno que tenía una concentración de  $6 \times 10^{-4}$  g/mL, se agitó y mantuvo entre 18-20 °C durante 15 min (Cordero, *op. cit.*), posteriormente se realizó una decantación para separar el adsorbente del colorante remanente, de la segunda se tomó una alícuota para aforarla a un volumen conveniente con lo que se efectuó cierta dilución (D). La solución así obtenida se midió en el espectrofotómetro y se obtuvo la absorbancia (A), ésta se sustituyó en la ecuación 1 calculándose así la concentración adsorbida (Cad)

Ahora bien, considerándose la experiencia de la curva de calibración y designando por Co ( $6 \times 10^{-4}$  g/mL) a la concentración inicial de la solución y por Cad la cantidad adsorbida por el carbón, se tiene que:

$$C_o = C_{ad} + C_r \quad \dots(2)$$

$$C_{ad} = C_o - C_r \quad \dots(3)$$

Donde la concentración remanente (Cr) se obtiene del tomar una alícuota que se diluye en un determinado volumen, la cual debe multiplicarse por la dilución (D) y la ecuación 3 se escribe en la forma siguiente:

$$C_{ad} = C_o - CrD \quad \dots(4)$$

De donde se considera que las concentraciones estén expresadas en g/mL, por lo que Cad debe multiplicarse por el número de mililitros de solución decolorados (V) y la ecuación 4 se expresa así

$$Cad_2 = Cad_1 V = (C_o - CrD)V \quad \dots(5)$$

Ahora se debe considerar que Cad<sub>2</sub>, es la cantidad adsorbida por el peso (P) de la muestra. Si se divide la ecuación 5 entre P, se tiene la cantidad adsorbida por gramo de carbón.

$$Cad = \frac{Cad_2}{P} = \frac{V (C_o - CrD)}{P} \quad \dots(6)$$

Si se sustituye la ecuación 1 en la 6 se obtiene la ecuación 7.

$$Cad = \frac{V [ C_o - D( mA + b) ]}{P} \quad \dots(7)$$

Sustituyendo

$$C_{ad} = \frac{25 \text{ mL} [6 \times 10^{-4} \text{ g/mL AM} - (100 \text{ mL} (8.79A - 0.157) \times 10^{-6} \text{ g/mL})]}{0.5 \text{ g}}$$

En donde el peso (P) de un adsorbente se mezcla con un volumen (V) de una solución binaria, ocurriendo la adsorción preferente del soluto o adsorbato; por consiguiente la concentración inicial del soluto (Co), cae al valor final del equilibrio (Cf). Según la ecuación 8 de Gibbs (Morris, 1982).

$$C_{ad} = \frac{(C_o - C_f)V}{P} \quad \dots (8)$$

Donde

Cad: concentración adsorbida (mg de adsorbato/g de adsorbente)

Co: concentración inicial de soluto (mg de soluto/mL de solución)

Cf: concentración final de soluto en el equilibrio (mg/mL)

V: volumen de solución utilizada en el proceso (mL).

P: masa de adsorbente utilizada en el proceso (g)

Es notoria la igualdad entre la ecuación 7 y 8, por lo tanto al emplear la ecuación 7 se sustituyeron los valores obtenidos en la curva de calibración como son la pendiente (m), la ordenada al origen (b) y la absorbancia (A). Siendo utilizada dicha relación para la obtención del tiempo de carbonización, la temperatura de carbonización y concentración del activante en la carbonización.

Se realizó una comparación entre cinco tipos de carbones activados comerciales como son el Clarimex, Darco, Sigma, Merck y Norit con el CA-lirio. Se midió la capacidad adsorptiva de cada uno aplicando la ecuación 7. Las superficies específicas de cada uno se determinaron de manera indirecta utilizando la relación lineal encontrada por Cetina, Chao y Cuervo (1973) adaptada por Benítez (1985) entre la capacidad de adsorción del azul de metileno en g de AM/g de CA frente a superficies específicas en m<sup>2</sup>/g CA, encontradas por el método Brunauer, Emmett y Teller (BET)(1938).

### Tiempo de equilibrio

El tiempo de equilibrio se alcanza en el momento en que el número de moléculas que se adsorbe es igual al número de moléculas que se desorbe dependiendo del tiempo.

Experimentalmente se determinó el tiempo en el cual se muestre una adsorción constante. Se escogieron para ésta evaluación tiempos entre 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 min.

La técnica a seguir fue semejante a la mencionada anteriormente, la cual se llevó a cabo al colocar 25 mL de la solución conocida de azul de metileno ( $6 \times 10^{-4}$  g/mL) en 0.5 g de carbón activado durante los tiempos mencionados anteriormente a una temperatura constante (entre 18 y 20°C). Después de éste tiempo las muestras se decantaron y se determinó la concentración en el remanente utilizando la ecuación 7. Para alisar los valores se utilizó la media acumulada.

#### Obtención de las isotermas de adsorción

Una vez establecido el tiempo de equilibrio se obtuvieron las isotermas de adsorción, siendo éstas las gráficas que describen la cantidad de sustancia adsorbida en función de la concentración a temperatura constante (Gallina,1984). Existen modelos matemáticos que hacen posible obtener dichas isotermas. Algunos de éstos son los representados por las ecuaciones de Freundlich y de Langmuir, los cuales forman parte de la adsorción estática (en este caso el adsorbente y la fase que contienen el adsorbato son estacionarios).

a) Ecuación de Freundlich. La forma general de esta ecuación es:

$$a = KC^{1/n} \quad \dots(9)$$

Donde

a : No. de mg/g adsorbidos por peso unitario de adsorbente (masa de adsorbente/masa de adsorbato).

C : Concentración de la sustancia remanente no adsorbida en el equilibrio (masa de soluto/ volumen de solución).

K y 1/n : Constantes particulares del sistema (Treybal, 1968)

Al ser ajustada a una recta la ecuación 9, se obtiene:

$$\log a = \log k + 1/n \log C \quad \dots(10)$$

b) Ecuación de Langmuir. Dicha ecuación está dada por la expresión:

$$a = \frac{ambC}{1 + bC} \quad \dots(11)$$

Donde

- a : Cantidad adsorbida (mg/g)
- am : mg adsorbidos por gramo de adsorbente
- C : Concentración de adsorbato en la solución (mg/mL).
- b : Coeficiente de adsorción.

Si se ajusta a una recta la ecuación 11, se tiene

$$C/a = 1/amb + (1/am)C \quad \dots( 12 )$$

Puesto que am y b son constantes, al trazar C/a ante C resultó una línea recta cuya pendiente fue 1/am y la ordenada en el origen 1/amb.

Experimentalmente se obtuvieron las isotermas de adsorción al ir variando la concentración del azul de metileno partiendo de la solución patrón de 6 g/mL de la cual se inició para hacer una serie de soluciones de diferente concentración ( $6 \times 10^{-1}$ ,  $2 \cdot 10^{-3}$ ,  $4 \cdot 10^{-5}$  y  $6 \cdot 10^{-6}$  g/mL). Se calculó la adsorción y se graficó contra la concentración de equilibrio que es aquella que quedó en el sobrenadante transcurrido el tiempo de equilibrio.

La proximidad a 1 para el factor de correlación en las ecuaciones 10 y 12 denotó el posible tipo de isoterma representado (Cordero, 1979).

## Construcción y montaje del prototipo filtrante

### Construcción

Los prototipos filtrantes funcionaron bajo el principio de capacidad adsorbente. La construcción de los prototipos fue sustentada en modelos de filtros comerciales (Turmix, Chicago, SEDUE etc.) y experimentales ( APHA *et al*, 1985). En la Figura 4 y Tabla siguiente, se aprecian los componentes de los filtros así como de su ensamblaje.

| Tipo | Material contenedor  | Material de separación e hidráulico   | Lecho adsorbente  |
|------|--|---|---|
| 1    | Tubo de vidrio de 1.7 cm de diámetro y 50 cm de largo                                    | Fibra de vidrio en ambos lados de la columna, mangueras y llaves que regulen el gasto.  | Carbón activado granular, Tamaño 2.38 mm x 0.42 mm $\phi$ o tezontle, tamaño 0.84 mm x 0.42 mm $\phi$                 |
| 2    | Tubo de cloruro de polivinilo (PVC) de 5 cm de diámetro y 50 cm de largo y tapas de PVC. | Fibra de vidrio en ambos lados del tubo contenedor entre la tapa y este. Además entre el lecho adsorbente así como de llaves y mangueras. | Tezontle con un tamaño de partícula de 2.38 mm X 0.42 mm y CAG con un tamaño de partícula de 0.84 mm x 0.42 mm $\phi$ |

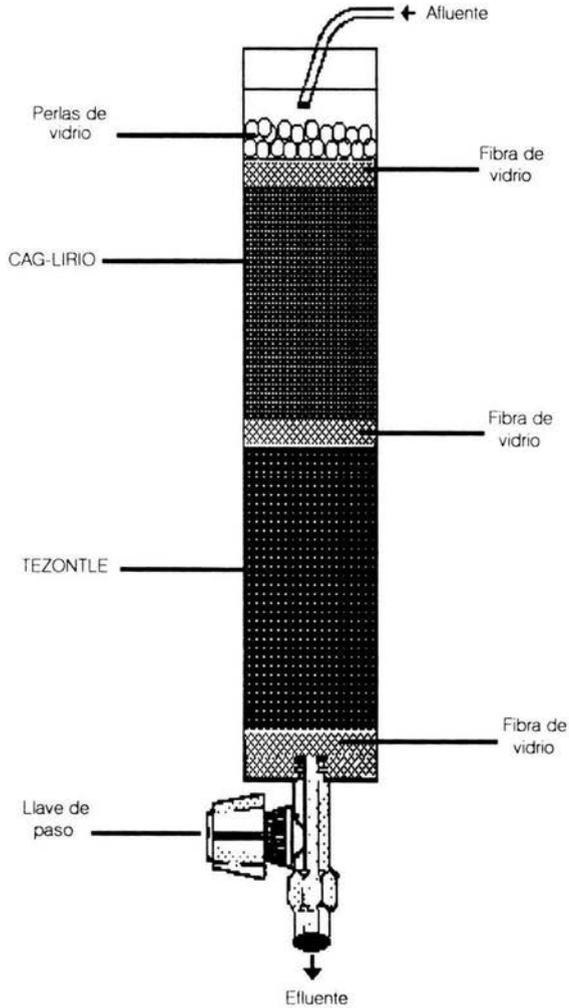
$\phi$  Diámetro de partícula

### Montaje

El montaje o empaque de los prototipos filtrantes se realizó de acuerdo a la siguiente Tabla.

| Columna                     | Tipo | Lecho filtrante                               |
|-----------------------------|------|---|
| ALFA ( $\alpha$ )           | 1    | Carbón activado granular (CAG) (100 %) 12.5 g |
| BETA ( $\beta$ )            | 1    | Tezontle (100 %) 96.2 g                       |
| ALFA BETA ( $\alpha\beta$ ) | 2    | CAG (50 %) Y Tezontle (50 %) 35.2 y 355 g     |

Fig. 4 Esquema del prototipo filtrante.  
(Filtro alfa-beta).



## Prueba de adsorción dinámica

Para la evaluación de los filtros se consideró el proceso de adsorción dinámica.

Kirk & Donald (1961), mencionan que en este proceso el adsorbente está en contacto con una corriente forzada del adsorbato en solución, es decir, al hacer pasar un fluido del que se ha separado una o más sustancias a través de un lecho fijo de adsorbente granular. Cuando se tiene un equilibrio de adsorción favorable, se puede aplicar el siguiente balance de materia para el adsorbato, por medio del cual se puede calcular el tiempo  $\Phi_b$  en que ocurre el "punto de ruptura" (Cuando la parte inferior de la zona de adsorción alcanza el fondo del lecho fijo, que se manifiesta como un aumento brusco en la concentración del soluto en el efluente del lecho adsorbente) según la ecuación siguiente:

$$G_s(C_o - C_f)\Phi_b = Z_s \delta_s(X_t - X_o) \quad \dots(13)$$

Donde

$G_s$ : Gasto volumétrico en el lecho adsorbente (mL/min cm<sup>2</sup>)

$C_o$ : Concentración inicial del adsorbato o contaminante, alimentado al lecho adsorbente (mg/mL).

$C_f$ : Concentración del adsorbato en el efluente del lecho adsorbente, cuando se llega el "punto de ruptura" y se encuentra en equilibrio (mg/mL)

$\Phi_b$ : Tiempo en que cambia drásticamente la concentración del contaminante en el efluente del lecho adsorbente; esto es en el "punto de ruptura" de la onda de adsorción dinámica (min)

$Z_s$ : Longitud del lecho útil hasta el "punto de ruptura" en una onda de adsorción dinámica (cm).

$\delta_s$ : Densidad del lecho adsorbente (g de adsorbente/cm<sup>3</sup>)

$X_t$ : Adsorción total en el equilibrio (mg/g de adsorbente).

$X_o$ : Concentración del contaminante o de adsorbato en el adsorbente en tiempo de equilibrio (mg/g de adsorbente).

En el laboratorio se determinó el tiempo:  $\Phi_b$  a la misma velocidad de flujo ( $G_s$ ).

El Lecho útil se calculó al despejar  $Z_s$  de la ecuación 13 (Ec. 14).

$$Z_s = \frac{G_s(C_o - C_f)\Phi_b}{\delta_s(X_t - X_o)} \quad \dots(14)$$

Así mismo se calculó la longitud del lecho sin utilizar (LUB) al final del proceso, por medio de la ecuación 14, considerando que el lecho total (Z) es:

$$Z = Z_s + LUB \quad \dots(15)$$

$$Z_s = Z - LUB \quad \dots(16)$$

En la ecuación 14, fue necesario calcular la densidad del adsorbente

$$\delta_s = m/v \quad \dots(17)$$

Donde el significado de cada literal es:

$\delta_s$  : densidad del lecho adsorbente ( $g/cm^3$ )

m : masa del adsorbato (g)

v : volumen de las partículas del adsorbente ( $cm^3$ )

Con base a todo lo anterior se explica que para el llenado de la columna  $\alpha$  se pesaron 12.5 g aproximadamente (m) de partículas de carbón activado granular (CAG) con diámetro de 2.38 mm X 0.42 mm tratadas con HCl 10 %, hasta alcanzar una longitud total del lecho (Z) de 30cm.

La columna  $\beta$  se empacó con tezontle con un tamaño de partícula de 0.84 mm X 0.42 mm, pesándose cerca de 96 g (m) hasta alcanzar una longitud total de 30 cm.

En la columna  $\alpha\beta$  se colocaron 355 g de tezontle y 35 g de CAG (ambos son m) hasta completar ambos los 30 cm de longitud total del lecho adsorbente(Z).

A cada columna se le adicionó un volumen medido de agua desionizada, mayor que el necesario para humedecer la masa del adsorbente, previamente la llave de paso se mantuvo cerrada.

Se adicionaron lentamente pequeñas porciones de las partículas adsorbentes (sea el caso del tipo de columna), sin que se extrajera el material adsorbente y el agua, hasta completar Z.

Se añadieron perlas de vidrio, hasta alcanzar 2 cm de altura de lecho. En una probeta graduada se extrajo el agua desionizada de la columna, abriendo la llave de paso un poco se sacó agua hasta que el menisco de la misma coincidiera con el nivel de las perlas de vidrio manteniéndola como carga constante.

### Desarrollo del proceso de adsorción dinámica

- a) Se adicionó agua desionizada dentro de la columna por las paredes con ayuda de una pipeta volumétrica, hasta un nivel de 5 cm por encima de las perlas de vidrio, sin perturbar la superficie adsorbente.
- b) Se quitaron las pinzas de presión de la manguera y se abrió la llave de paso de la columna.
- c) En una probeta graduada se efectuaron varias mediciones del volumen del afluyente por minuto (mL/min)
- d) Con la llave de paso se obtuvo el gasto volumétrico de la misma.
- e) El nivel de agua en la columna se trató de mantener constante.
- f) Cuando se reguló el gasto con la llave de paso, se detuvo el flujo al colocar unas pinzas de presión sin mover en ningún momento la llave de paso.
- g) Se dejó bajar el nivel del agua hasta que el menisco coincidió con la capa de perlas de vidrio.

### Toma de muestras.

- a) Se comenzó con una columna (sea  $\alpha, \beta$  o  $\alpha\beta$ ) con un gasto volumétrico constante.
- b) Se hizo pasar el agua cruda por la parte superior de cada columna.
- c) Para el tiempo  $t = 0$  min. se tomó un testigo igual en volumen a la cantidad de agua desionizada que quedara en los intersticios del adsorbente, según sea el caso, cuando fue empacada la columna. Para lo anterior se quitaron las pinzas de la columna.
- d) En frascos de plástico etiquetados desde el tiempo  $t = 1$  hasta  $t_x$  se eligieron correspondientemente las muestras de la 1 hasta la  $x$  final.

Al utilizar la ecuación 14 se necesitó obtener la densidad ( $\delta$ ) (ec.17) del tezontle, así mismo de ambos bajo el siguiente procedimiento. Una masa de 30 g de CA, tezontle y CA-Tetz, ambos por separado, se colocaron en una probeta graduada adicionando un volumen conocido de agua:  $V = 20$  mL (para evitar la formación de burbujas que se adhieran a la superficie del adsorbente se le colocó a la probeta un tapón horadado por donde se introdujo una manguera aplicando vacío, evitando que el adsorbente se proyecte fuera de la probeta). El experimento se repitió dos veces obteniendo un volumen final ( $V_f$ ) de agua desplazada en la probeta (Sarmiento, *op. cit.*)

Las variables de adsorción total ( $X_t$ ), volumen de agua purificada ( $V$ ) y tiempo en el que ocurre el "punto de ruptura" ( $\Phi_b$ ) se obtuvieron de las curvas de las ondas de adsorción, que resultaron de graficar la concentración del contaminante vs. tiempo de funcionamiento y de una curva de eficiencia o remoción que relaciona la concentración del efluente vs. adsorción total.

### **Evaluación de eficiencia y remoción de los prototipos filtrantes**

El agua de alimentación se preparó expreso, para simular un agua que a pesar de que fue sometida a potabilización, el líquido presenta contaminación. La cantidad de agua que se preparó fue de 100 L para la columna  $\alpha\beta$  y para las columnas  $\alpha$  y  $\beta$  se hicieron pasar 2000 mL respectivamente.

El agua cruda se hizo pasar por la parte superior (afluente) y la toma de muestras se realizó por la parte posterior (efluente).

El agua cruda se preparó y analizó bajo las siguientes especificaciones:

**COLOR.-** Se preparó una solución con ortonitroanilina con el objeto de tener un agua con color a una concentración de 100 U(Pt/Co) para los tres tipos de columna (Cordero, *op. cit.*, Carrillo, *op. cit.*), midiéndose el color remanente con ayuda de un espectrofotómetro HATCH modelo DR/2000 con el método 8025 programado para medir color.

**TURBIEDAD.-** Se usó la diatomita como material formador de turbiedad, se pesó 0.1 g de diatomita en 1 L de agua y diluyéndola en 50 L de agua ofreciendo una turbiedad de 30 NTU, midiéndose esta con ayuda de un turbidímetro La Motte Mod. 2000B. (INCO. 1992)

La toma de muestras se realizó cada 5 L hasta completar 100 L de cada muestra, esto en el caso de la columna  $\alpha\beta$ . En las columnas  $\alpha$  y  $\beta$  se realizó cada 100 mL hasta completar 2000 mL. Se consideró como testigo al agua desionizada que se obtuvo en su empaçado.

Se escogió tanto color como turbiedad por ser características que aumentan o disminuyen la aceptabilidad del consumidor por el agua potable.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Durante el proceso de fabricación son importantes las siguientes variables:

### a) Naturaleza del material a carbonizar

Con respecto a la naturaleza del lirio acuático, éste presentó 96 % de agua y 4 % de fibra vegetal, esto es debido a su morfo-fisiología, la cual es parte de su adaptación a los sistemas acuáticos en los cuales habita, como ejemplo se puede mencionar la presencia de un tejido con grandes espacios aéreos (aérenquima), áreas foliares grandes, alto número de estomas entre otros. (Gopal, 1987). Dicha proporción de agua es semejante a lo reportado por Penfound & Earle (1948), Carrillo (1976) y Holm (1985), quienes aseveran que dicha cantidad de agua es como consecuencia del medio ambiente en donde se encuentra dicha planta.

Por lo tanto se obtuvo que de 300 Kg de lirio fresco su correspondiente a materia seca fue de 13.5 Kg, siendo ésta quebradiza y frágil debido probablemente a la hemicelulosa que constituye a la fibra (Figura 5).

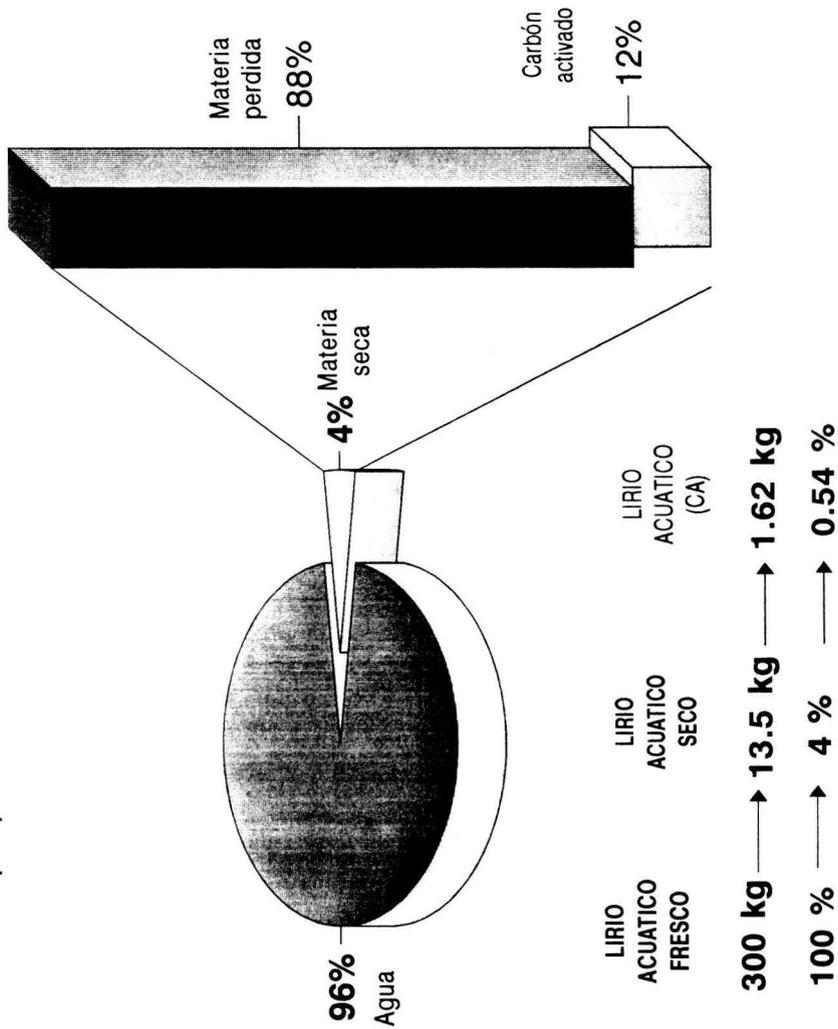
### b) Temperatura y tiempo de carbonización.

La temperatura como factor importante durante la carbonización depende del material a carbonizar y del método empleado. Por lo que después de probar una serie de temperaturas de carbonización en un intervalo de 400-1200 °C (Tabla 1), se obtuvo una gran adsorción cuando el proceso de fabricación se hizo a 850 °C con 65.52 mg AM/g CA-lirio (Figura 6). Así mismo el tiempo de carbonización en el que se determinó una adsorción de 87.71 mg AM/g CA-lirio fue de 20 min, como resultado de evaluar una serie de tiempos en un intervalo de 3-120 min.

En general se observó que al aumentar la temperatura y el tiempo de carbonización se incrementa la actividad adsorptiva, pero resulta que al carbonizar por arriba de la temperatura y el tiempo óptimo se disminuye la actividad del carbón formado. Erdos (1960), considera que esto es debido posiblemente a un cambio rápido en la estructura y configuración del carbón mismo o a la presencia de complejos polimerizados.

Pennick (1976), describió los efectos del tratamiento calórico del material carbonáceo estableciendo que la estructura resultante es un compuesto de cadena larga o moléculas aromáticas; los resultados de la polimerización son un sistema de moléculas de estructura planar.

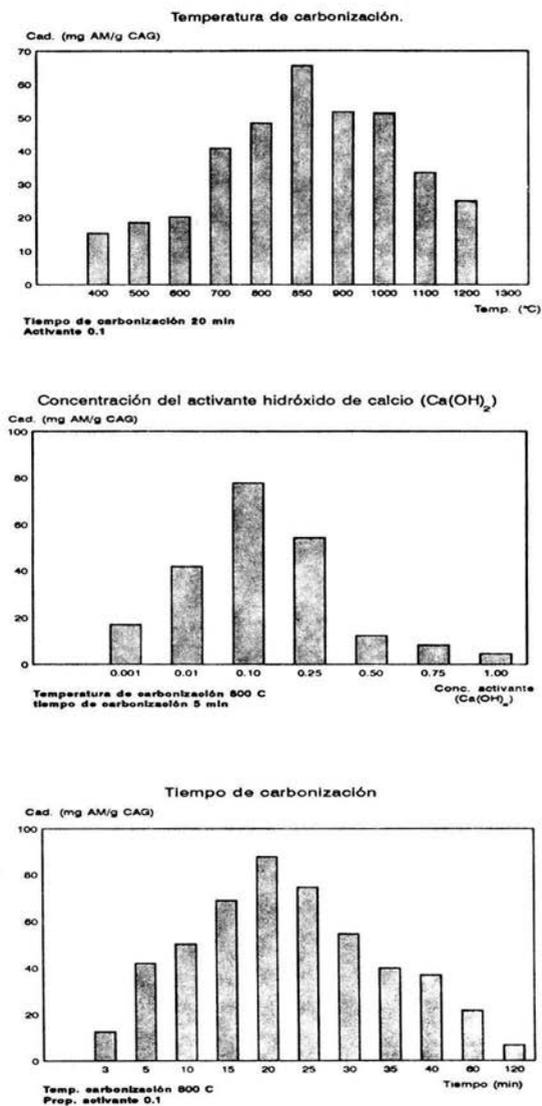
Figura 5. Rendimiento del lirio acuático al trasformarlo en carbón activado (CA).



**Tabla 1. Factores considerados en la obtención de carbón activado a partir del lirio acuático seco.**

| Temperatura de carbonización (°C) | Adsorción (mg AM/ g CAG) | Concentración de activante (Ca(OH) <sub>2</sub> ) (lirio seco : activante) | Adsorción (mg AM/g CAG) | Tiempo de carbonización (min) | Adsorción (mg AM/ g CAG) |
|-----------------------------------|--------------------------|--|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 400                               | 15.32                    | 1 : 1.00   | 4.515                   | 3                             | 12.374                   |
| 500                               | 18.55                    | 1 : 0.75   | 8.209                   | 5                             | 41.796                   |
| 600                               | 20.18                    | 1 : 0.50   | 12.180                  | 10                            | 50.035                   |
| 700                               | 40.85                    | 1 : 0.25   | 54.335                  | 15                            | 68.697                   |
| 800                               | 48.41                    | <b>1 : 0.10</b>  | <b>77.713</b>           | <b>20</b>                     | <b>87.714</b>            |
| <b>850</b>                        | <b>65.52</b>             | 1 : 0.01   | 41.796                  | 25                            | 74.463                   |
| 900                               | 51.75                    | 1 : 0.001  | 16.880                  | 30                            | 54.335                   |
| 1000                              | 51.45                    |  |                         | 35                            | 39.692                   |
| 1100                              | 33.45                    |  |                         | 45                            | 36.757                   |
| 1200                              | 24.94                    |  |                         | 60                            | 21.548                   |
|                                   |                          |  |                         | 120                           | 6.682                    |

Figura 6. Factores determinantes en la elaboración de CA utilizando lirio acuático seco.



De acuerdo a lo anterior, para Mattson y Mark (1971), en un intervalo de 200 a 400 °C se forma un sólido como resultado de la formación de enlaces C-C entre los planos vecinales, conformándose como monedas apiladas. De 400 a 700 °C, los sólidos crecen en forma gradual y condensada, pero todos los átomos de carbono periféricos son atraídos por los enlaces químicos, por átomos de hidrógeno o grupos de hidrocarburo. Por lo tanto estas sustancias son teóricamente condensadas en sólidos moleculares entre 700 y 800 °C; muchos de los grupos de hidrocarburo son llevados fuera de la periferia del sistema de anillos formando sistemas de pequeños cristalitas con estructura similar al grafito. Las valencias libres y las esquinas de los planos son reactivas, y quizá a su presencia se debe el fenómeno de adsorción.

### c) Composición del activante.

Cuando se carboniza un material carbonoso, el material obtenido es poco adsorbente, por lo que se ha procurado aumentar la capacidad de adsorción del carbón al mezclarlo con un activante.

El hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) como agente activante sólido propició una elevación de la adsorción de azul de metileno de 77.71 mg AM/g CA-lirio en una proporción de 0.1 de mezcla (Tabla 1).

El uso de agentes activantes sólidos como el hidróxido de calcio, permite realizar el proceso de carbonización-activación en una sola etapa comparado con el método tradicional gaseoso en donde se requiere de dos etapas: carbonización y activación del carbón obtenido (Kirk y Donald 1961; Deitz, 1944).

La explicación que Hassler (1951) supone del agente activante mineral durante la carbonización, es que éste provee un esqueleto en el que el carbón es depositado y el carbón así formado se une a los elementos minerales por medio de las fuerzas de adsorción. Una evidencia de la magnitud de esta fuerza de unión se muestra cuando se queman sustancias carbonosas en los utensilios de cocina.

Durante el proceso de activación se despejan espacios entre los cristales elementales de carbón, formándose los poros. Una activación adecuada origina una gran cantidad de poros, cuya área incrementa la superficie de contacto del material procesado.

La oxidación del material se inicia con el ataque a los grupos funcionales, formándose así los macroporos. Posteriormente el ataque se concentra en los planos de los cristales, formando los microporos. Cuando existe materia inorgánica en el carbón, ésta produce enlaces estructurales en el sólido lo cual vuelve más susceptible de ataque y más activo este lugar de la superficie.

Como resultado, Dubinin (1966), propuso un modelo del carbón activado que consiste en una estructura de microcristalitos y de poros, clasificándola de la siguiente manera:

- Microporos, menor 15 a 16 Å de radio.
- Poros intermedios, 15-16 a 1000-2000 Å de radio.
- Macroporos, mayor de 1000 a 2000 Å de radio.

Los macroporos son considerados como las arterias de transporte. Una gran área de poros transicionales es asociado a la fase carbón-líquido y que es la más importante pues es ahí donde se desarrolla la adsorción (Aguilar, 1985). Carbones con gran cantidad de microporos presentan energía de adsorción alta (Dubinin, *idem.*).

Confirmando lo anterior, Tapia (1978), manifiesta que el carbón activado es un polímero complejo formado por microcristales unidos por sus extremos en los cuales existen dos posibles lugares donde un soluto pueda adsorberse; sobre los planos o en los bordes de los microcristales. Estos dos sitios tienen diferentes propiedades, las superficies planas son probablemente de naturaleza más uniforme, con poca posibilidad de grupos funcionales debido a que los electrones en los átomos de carbón están compartidos por los enlaces covalentes entre ellos. De esto se puede predecir que la adsorción se lleva a cabo por fuerzas de Van der Waals.

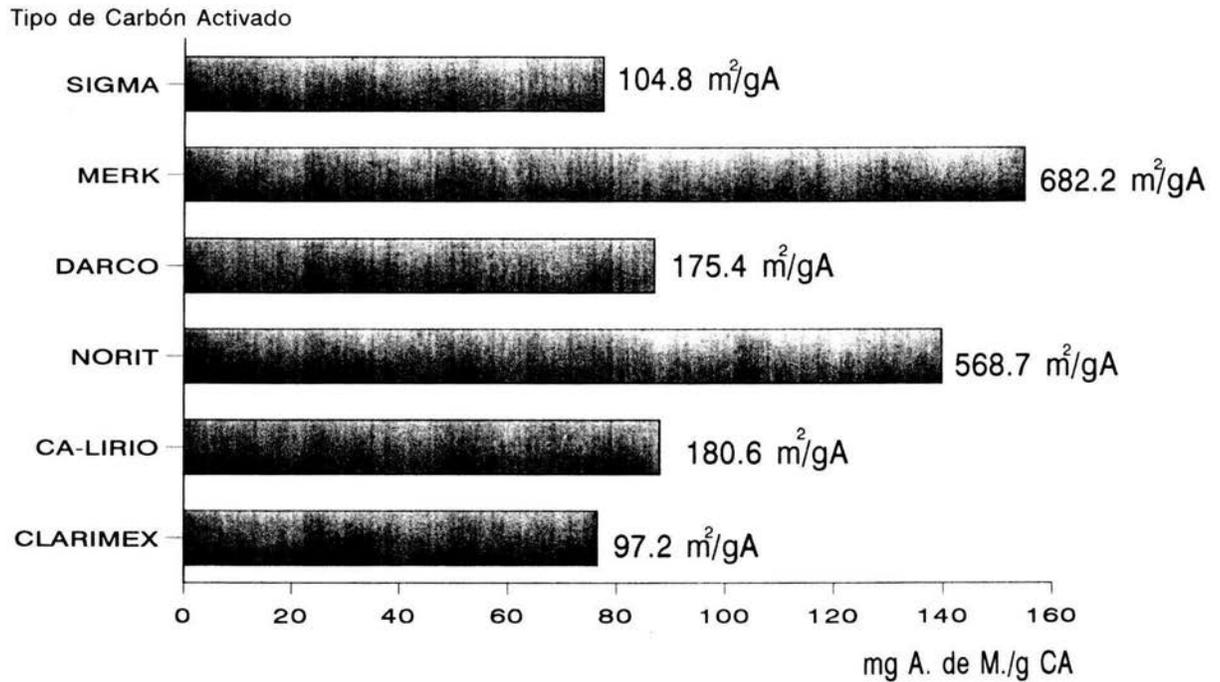
Es así que al aplicar el conjunto de las variables de carbonización y activación se consiguió un CA con una adsorción de 87.7 mg AM/g de CA-lirio que muy posiblemente presentan una gran cantidad de poros intermedios (Aguilar, 1985).

Resulta entonces que los 13.5 kg de materia seca, al ser transformados en carbón activado produjeron 1.62 kg, lo que representa un rendimiento del 12 % respecto al lirio acuático seco y del 0.54 % al lirio fresco (Figura 5).

Carrillo (1976), determinó un rendimiento del 12 %, esto debido a que el material es muy frágil y quebradizo lo que se puede atribuir a que está constituido fundamentalmente por hemicelulosa (Figura 5). Al comparar este rendimiento con el de la madera a 1,000 °C, se anota que la segunda es constituida por celulosa en un 20 % (FAO, 1983), por lo que la del lirio rinde 8 % menos que la madera, no existiendo gran diferencia entre la celulosa y la hemicelulosa por ser dos hexosas.

Al comparar la adsorción del carbón activado de lirio (CA-lirio) con cinco carbones activados comerciales se evidenció que el CA-lirio ocupa un tercer lugar en la adsorción con 87.7 mg AM/g CA-lirio y un área específica de 180 m<sup>2</sup>/g calculada de manera indirecta utilizando la relación lineal encontrada por Cetina, Chao y Cuervo (1973) adaptada por Benítez (1985) entre la capacidad de adsorción del azul de metileno en g de AM/g de CA frente a superficies específicas en m<sup>2</sup>/g CA, encontradas por el método Brunauer, Emmett y Teller (BET) (1938). La mejor capacidad adsorptiva fue la de Merck con 155 mg AM/g CA y un área específica de 682.23 m<sup>2</sup>/g, y la más baja del carbón fabricado por Clarimex es menor en dicha capacidad (76.5 mg AM/g CA) y superficie específica (97.28 m<sup>2</sup>/g) (Figura 7).

Figura 7. Comparación de la capacidad adsorbente (mg AM/g CA) y área específica ( $m^2/g$ ) de varios tipos de carbones activados de marca con el de lirio acuático



Estas diferencias en la área específica y la capacidad de adsorción son consecuencia según Mantell (1947), a que cada carbón tiene materia prima diferente.

Es evidente que entre más pequeña sea la partícula mayor será la capacidad de adsorción, pero al comparar los carbones Darco y Sigma que también son en polvo como en este caso el CA-lirio, este último presenta una adsorción intermedia.

Jiménez (1988), hace notar que debido a que cada sistema adsorbente-adsorbato presenta características propias es difícil generalizar propiedades, por lo que resulta que 2 o más carbones activados puedan tener capacidad adsorbente semejante para un adsorbato A, pero diferente para otro B, por lo tanto la medida de la capacidad de adsorción del AM en estos tipos de carbones resulta diferente. Además pone de manifiesto que es mayor la adsorción de solutos covalentes con respecto a los iónicos.

Merck (1989), al caracterizar su carbón, enuncia que posee centros activos catiónicos, debido a este hecho, es posible que el CA-lirio sea capaz de adsorber el azul de metileno por tener tres nitrógenos básicos, dos tipo amina y otro pirimídico.

El azul de metileno es un colorante catiónico. Graham (1955) citado por Broughton (1981), investigó la adsorción del azul de metileno y considera al adsorbato como una entidad y no como un agregado molecular formándose una base incolora.

### **Adsorción estática**

Cordero (1979), explica que cuando se coloca un adsorbente sólido en contacto con una solución, la adsorción es una función creciente del tiempo al iniciarse esta, al aumentar la cantidad adsorbida, disminuye por ende la concentración de las moléculas cercanas hasta que la velocidad de desorción es igual a la adsorción, por lo tanto, se establece un equilibrio.

Dicho equilibrio se obtuvo después de valorar una serie de tiempos en un intervalo de 5-90 min, manteniendo una temperatura de 18-20 °C, una concentración de AM de  $6 \times 10^{-4}$  g/mL, utilizando 0.5 g de CA-lirio por cada prueba (Tabla 2).

En la Figura 8 se observa que los valores experimentales se comportan de una manera irregular, esto puede deberse según Barceló Correa y Flores (1992) a un enturbiamiento de la solución, probablemente debida a la coagulación del colorante en presencia de iones hidróxido que actúan sobre el azufre catiónico del azul de metileno, por lo que para poder entender dicho comportamiento se optó en aplicar un "alisamiento" de dichos datos, utilizándose para ello la media acumulada que demostró que a  $32.4 \pm 2.1$  min se presenta un equilibrio.

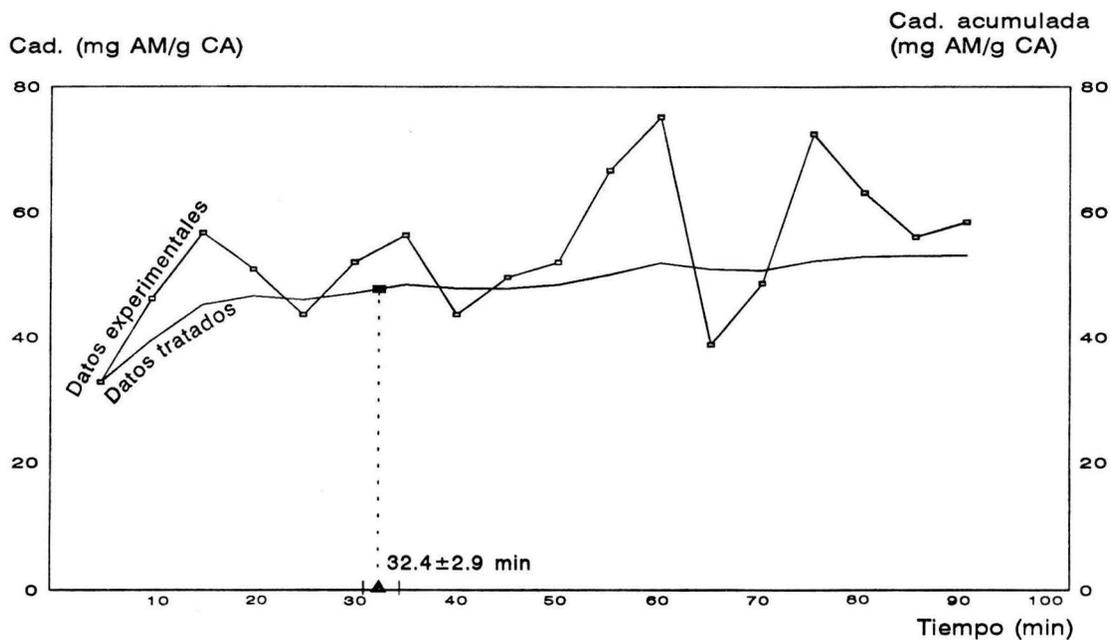
**Tabla 2. Datos experimentales y alisamiento de los mismos para obtener el tiempo de equilibrio necesario para las pruebas de adsorción estática.**

| Tiempo (min) | Concentración adsorbida (Cad) (mg AM/g CAG) | Cad (media acumulativa) (mg AM/g CAG) | Tiempo (min) | Concentración adsorbida (Cad) (mg AM/g CAG) | Cad (media acumulativa) (mg AM/g CAG) |
|--------------|---|---------------------------------------|--------------|---|---------------------------------------|
| 0            | 0.0   | 0.0                                   | 50           | 52.0  | 48.4                                  |
| 5            | 32.8  | 32.8                                  | 55           | 66.7  | 50.0                                  |
| 10           | 46.2  | 39.5                                  | 60           | 75.2  | 51.9                                  |
| 15           | 56.7  | 45.2                                  | 65           | 38.8  | 50.9                                  |
| 20           | 50.9  | 46.6                                  | 70           | 48.6  | 50.7                                  |
| 25           | 43.6  | 46.0                                  | 75           | 72.5  | 52.2                                  |
| 30           | 52.0  | 47.0                                  | 80           | 63.1  | 52.9                                  |
| 35           | 56.3  | 48.4                                  | 85           | 56.0  | 53.0                                  |
| 40           | 43.6  | 47.8                                  | 90           | 58.4  | 53.1                                  |
| 45           | 49.6  | 47.8                                  |              |   |                                       |

**TIEMPOS (min)**

**Tiempo máximo: 34.5    Tiempo equilibrio: 32.4    Tiempo mínimo: 30.4**

Figura 8. Tiempo de equilibrio de la adsorción de CA del lirio acuático



Conc. azul de metileno (AM):  $6 \times 10^{-4}$  g/mL  
Temperatura: 18-20°C  
Peso carbón activado de lirio: 0.5 g  
Tiempo de equilibrio ▲

Tapia (1978), asevera que este equilibrio es el tiempo de contacto necesario entre adsorbente y solución para efectuar la adsorción efectiva. Así mismo dicho tiempo de equilibrio depende de la cantidad de moléculas del adsorbato que dependen de la superficie del adsorbente.

Hassler (1951), obtiene el tiempo de equilibrio para azul de metileno en 10 min, utilizando una temperatura de 25 °C a una concentración de 0.1 milimol/L. Reportando haber encontrado que de acuerdo al tipo de carbón empleado varía el tiempo de equilibrio dentro de un intervalo de 5 min a 1 hr.

Al obtenerse el tiempo de equilibrio se procedió a obtener las isotermas de adsorción, estos resultados se presentan en la Tabla 3.

Los valores obtenidos experimentalmente se representan en la Figura 9a en donde se aprecia un incremento de la adsorción con respecto a la concentración de colorante utilizado, de una manera semejante a una sigmoide. Dicho comportamiento enmarca una pendiente mayor a la unidad, y debido a eso la curva consta de dos regiones: la región de bajas concentraciones, cóncava con respecto al eje de las abcisas y la de altas concentraciones de forma convexa.

Glastone (1972) y Barrow (1972), describen cinco tipos de curvas de las isotermas (Figura 10), de las cuales, la curva que se ajusta al comportamiento experimental es la del tipo II, que es donde se presenta una pendiente creciente a medida que aumenta la concentración de la solución, es decir, que cada incremento en la concentración de la solución origina un incremento cada vez mayor de soluto adsorbido.

Cabe mencionar que la curva de tipo I se asocia a procesos de adsorción química, en donde esta posee un tramo inicial de acusada pendiente, que gradualmente se va aproximando a una recta paralela al eje de las abcisas. La parte inicial corresponde a la gran tendencia que tiene la superficie por unirse son las moléculas del gas y la disminución se atribuye a la saturación de estas fuerzas.

Barrow (1972), explica que las otras curvas deben su comportamiento a una adsorción de tipo físico, en donde la adsorción se lleva a cabo en capas multimoleculares sobre la superficie en lugar de una sola llevándose a cabo la adsorción en los poros y capilares del adsorbente. Este mismo explica, que aun cuando estas teorías explican relativamente bien las isotermas, son insuficientes para explicar todos los fenómenos observados.

Al aplicar las ecuaciones que representan la relación entre el grado de adsorción de un líquido por un sólido y la concentración del mismo, se encontró que la representación gráfica de la ecuación de Freundlich y Langmuir representa una recta con una pendiente creciente (Figura 9b y 9c ).

**Tabla 3. Valores que conforman las isotermas de adsorción utilizando las ecuaciones de Freudlich.**

| Conc. de azul de metileno (AM) (g/mL) | Conc. adsorbida (Cad) experimental (mg AM/g CAG) | Cad. calculada Ec. Freudlich (mg AM/g CAG) |
|---------------------------------------|--|--|
| 0.001                                 | 3.9  | 10.9                                       |
| 0.005                                 | 63.4   | 56.5                                       |
| 0.01                                  | 293.3  | 114.7                                      |
| 0.05                                  | 307.5  | 523.3                                      |
| 0.1                                   | 2615.4   | 1203.9                                     |
| 0.5                                   | 9621.8   | 6227.1                                     |
| 1.0                                   | 22976.6  | 12636.9                                    |
| 5.0                                   | 26086.0  | 65358.5                                    |
| 10.0                                  | 102667.6   | 132635.1                                   |
|                                       |  | 1/n = 1.021                                |
|                                       |  | k = 12636.94                               |
|                                       |  | r = 0.9743                                 |

Figura 9. Isotermas de adsorción de Azul de metileno (AM) sobre CA-lirio.

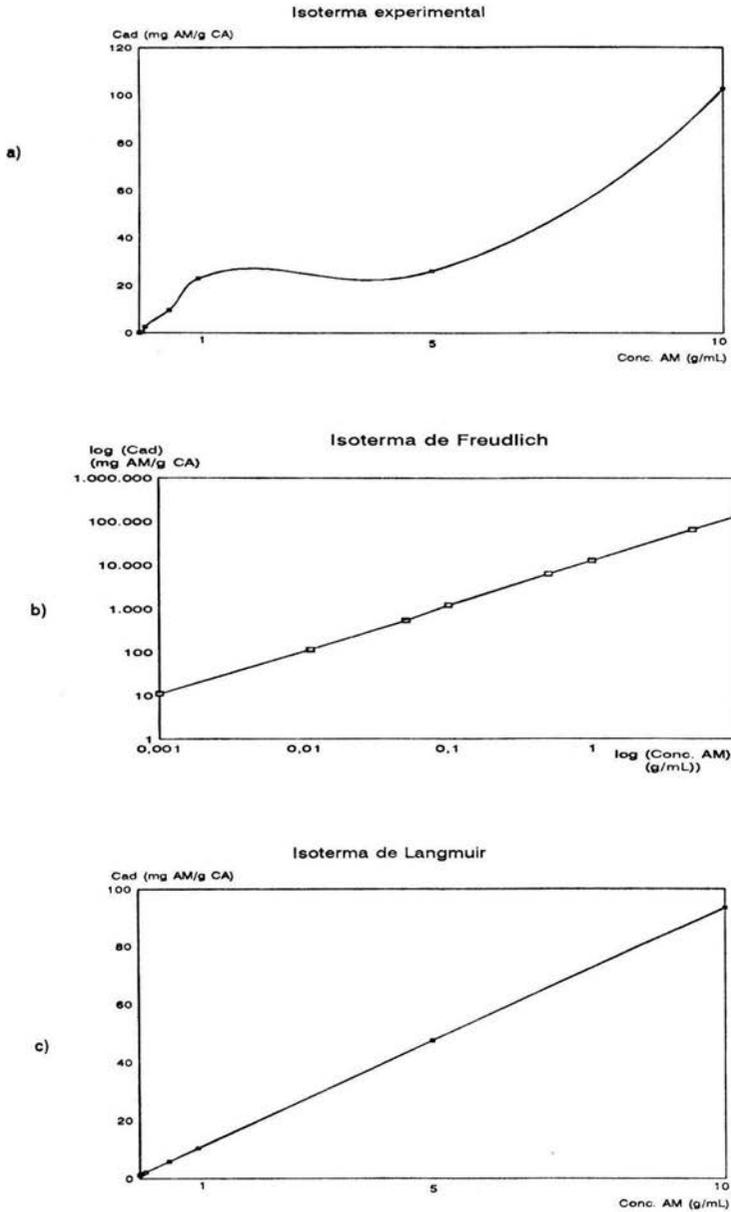
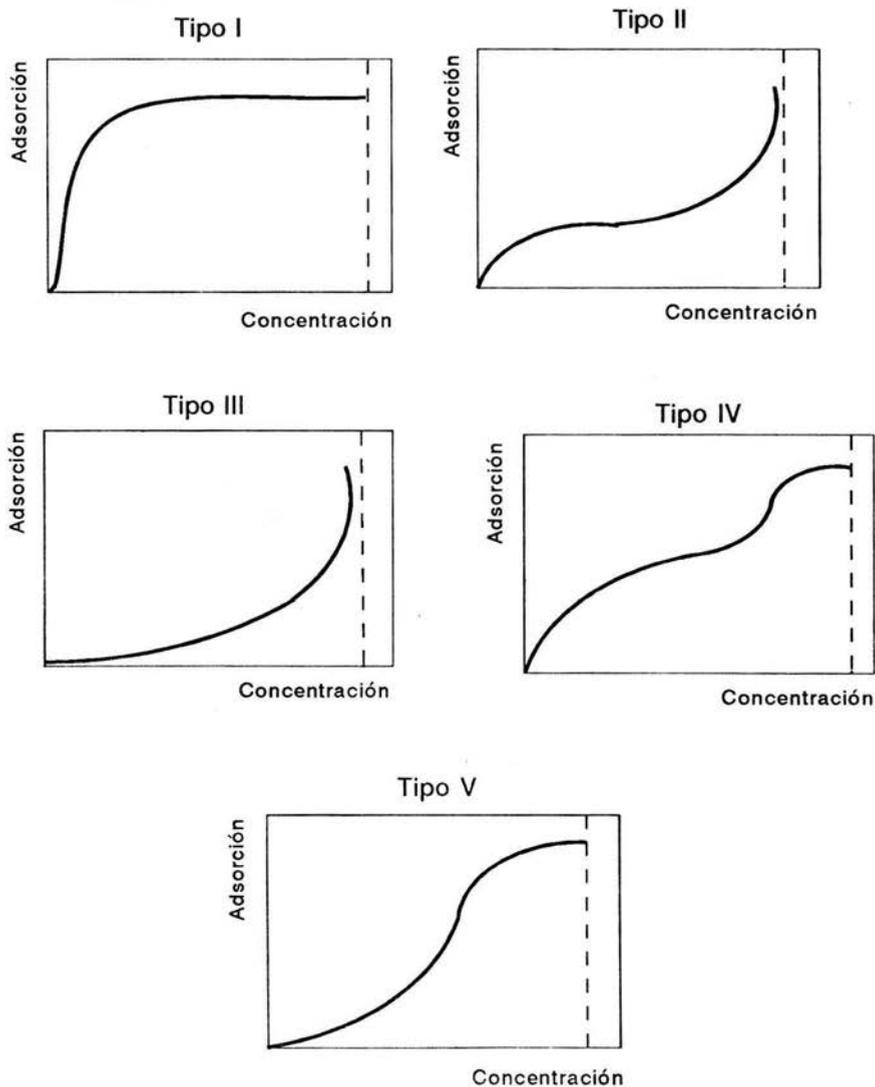


Figura 10. Isotermas frecuentes en la adsorción estática.



La ecuación de Freudlich (Ec. 9) al ser ajustada en una línea recta (Ec. 10) mostró una pendiente (1/n) igual a 1.021, una ordenada al origen (K) de 12636.94 con un factor de correlación (r) de 0.9743 que al sustituir:

$$\log a = 4.1 + (1.02) \log C$$

quedando la ec. 9

$$a = 12636.94C^{1.021}$$

para la forma líneal de la ecuación de Langmuir, la pendiente es:

$m = 1/am$ , despejando am se obtiene

$$am = 1/m = 1.08 \times 10^{-4}$$

la ordenada al origen (b) =  $1/amK$ , al despejar k queda

Al aplicar la ecuación de Langmuir Ec. 11 y al ser ajustada a una línea recta (Ec. 12) se obtuvo una pendiente (1/am) de 9227.43, una ordenada al origen (1/amb) de 1205.67 con un coeficiente de correlación (r) de 0.9587 quedando la ecuación 11 como:

$$c/a = 1205.68 + (9227.43)C$$

$$K = 1/bam = 7.65 \text{ mg AM/g CA}$$

por lo tanto la ecuación 12 queda ahora como

$$a = (1.08 \times 10^{-4})(7.65)C/1 + (7.65)C$$

Con los datos experimentales se calculó la adsorción y se graficó contra la concentración obteniéndose una línea recta.

Al comparar los factores de correlación de ambas ecuaciones y aplicando el criterio de Cordero (1979), se enmarca que la ecuación de Freudlich se aproxima más a la unidad en el ajuste a línea recta.

La ecuación de la isoterma de Freudlich relaciona empíricamente los datos de la isoterma y son establecidos para acceso a un gran número de adsorciones en soluciones (Tapia, 1978). En vista de su naturaleza empírica, el principal uso de la ecuación de Freudlich de adsorción es como una fórmula de interpolación empleándose frecuentemente con la adsorción a partir de una disolución.

Kirk y Donald (1961), detallan que aún cuando las exigencias de la ecuación se satisfacen a concentraciones bajas, a concentraciones elevadas los puntos experimentales quedan fuera de la recta. Indicando que esta ecuación no es de validez general para condiciones extremas.

La ecuación de Freundlich puede deducirse suponiendo que se trata de una superficie heterogénea (diferentes zonas con afinidades diferentes por el adsorbato) (Daniels, 1961).

La ecuación de Langmuir correspondió a la adsorción química (Curva tipo I) que es una monocapa, con alto calor de adsorción.

Los postulados principales de la isoterma de Langmuir son:

- a) La energía de adsorción  $E$ , es constante. Lo que indica una superficie con naturaleza homogénea y que no hay interacciones entre las moléculas adsorbidas.
- b) La adsorción es localizada, significa que las moléculas del adsorbente carecen de movimiento de traslación en la superficie del adsorbente.
- c) La adsorción máxima posible ocurre cuando se completa la capa monomolecular.

Weber (en Eckenfelder, 1981) en cambio explica que la adsorción química o quimisorción consta de la reacción de un adsorbato con el adsorbente, como resultado de una transformación del adsorbato que lleva como consecuencia, elevada temperatura de adsorción, dando lugar a lo sumo, a una monocapa donde la adsorción depende de la sustancia adsorbida como del adsorbente, liberando un calor superior a 20 kcal/mol.

Sin embargo, la ecuación de Langmuir no es una representación satisfactoria para los datos de la adsorción física.

De acuerdo a Daniels (*op. cit.*), existe una saturación aparente de la superficie, se cubre solamente un pequeño porcentaje del área total del adsorbente, demostrando que la adsorción máxima no permanece constante, sino son condicionadas por la temperatura, dichas desviaciones son posiblemente debidas a la superficie heterogénea, donde las diferentes regiones tienen afinidades distintas hacia la sustancia que está siendo adsorbida y dicho comportamiento se asemeja a la curva experimental (Figura 9a).

Glanstone (1972), afirma que una consecuencia del estudio de monocapas ha sido la formación de capas acumuladas que pueden contener centenares o incluso millares de capas orientadas y que es el comportamiento probable de la curva de las isotermas.

Brunauer, Emmett y Teller (1938), obtuvieron un modelo aplicable durante la adsorción física, donde las moléculas no sólo se adsorben superficialmente sino en la profundidad de varias capas. Suponen que la superficie posee sitios uniformes localizados y que la adsorción se verifica en los sitios cercanos, igual que en la teoría de Langmuir. Además suponen, que las moléculas pueden ser adsorbidas en estratos secundarios, terciarios y enésimos, siendo la superficie utilizable del enésimo estrato igual a la del estrato  $(n-1)$ , donde la energía de adsorción en el primer estrato  $E_1$ , es constante y que la energía de adsorción de los estratos subsiguientes es  $E_i$  igual a la energía de la solución.

Brunauer, *et al.* (*idem.*), han interpretado estos resultados sobre la base de la formación de una capa adsorbida única en concentraciones bajas, seguida de otras capas al aumentar la concentración. Siendo esta característica de la adsorción física que es donde el adsorbato y la superficie del adsorbente interactúan sólo por medio de las fuerzas de Van der Waals. Castellan (1971), asegura que en estos casos las moléculas adsorbidas están ligadas por enlaces débiles en la superficie y el calor de adsorción es bajo, afirma que el incremento en la temperatura disminuye la adsorción, además asegura que la magnitud de la adsorción sobre una superficie depende más de la sustancia que se adsorbe que del adsorbente y que durante la adsorción se forman capas múltiples.

Cordero (1979), afirma que el calor de adsorción es inferior a 10 kcal/mol así como la adsorción sólo se aprecia a temperaturas inferiores a la temperatura de ebullición de la sustancia que se adsorbe.

Guerasimov (1977), menciona que las moléculas que se adsorben físicamente pueden desplazarse libremente por la superficie del adsorbente dando lugar a una adsorción "no localizada".

Aunque la adsorción es esencialmente específica, la cantidad de adsorción varía con la naturaleza del adsorbente, y el sorbato.

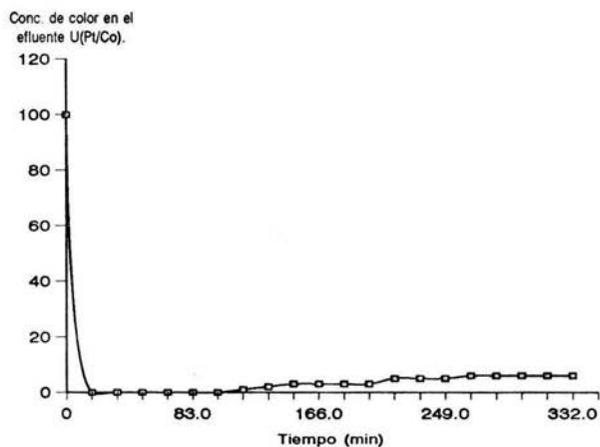
#### **Adsorción dinámica.**

Primeramente se determinó que la columna alfa en la remoción de color mostró un promedio de adsorción de  $96.85 \pm 2.45$  %, denotándose que la adsorción por gramo de carbón activado granular de lirio acuático (CAG-lirio) es de 15848 U(Pt/Co)/g CAG, este comportamiento se ve claramente manifiesto en la Figura 11, en donde la onda de adsorción se mantiene constante, del mismo modo aún cuando se enmarcan cambios en la eficiencia, éstos son mínimos por lo que no se rebasa una remoción del 94 % (Tabla 4).

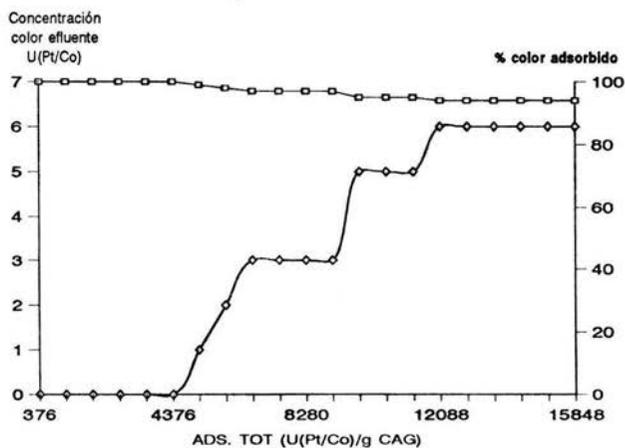
En cambio en la columna beta la onda de adsorción y de eficiencia presentan pequeños cambios (Figura 12) resulta notorio que la eficiencia disminuye un

Figura 11 Adsorción dinámica del color en la columna alfa.

Onda de adsorción



Eficiencia de adsorción



◇ Con. eflue. ◻ Eficiencia

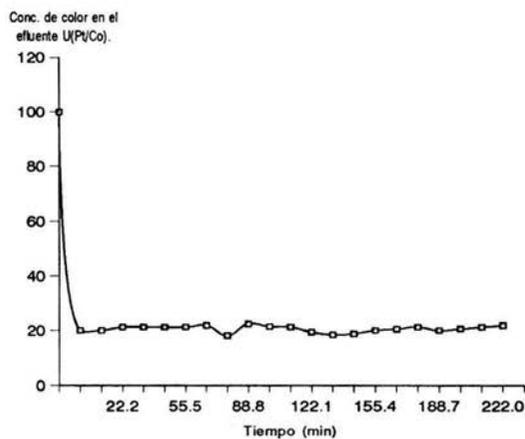
**Tabla 4. Adsorción de color (Pt/Co) por la columna alfa (CAG)**

| No. de muestra | Tiempo (min) | Volumen de muestra (mL) | Volumen acumulado de afluente (mL) | Concentración de color del efluente U(Pt/Co) | Alimentación C/16.6 min | Adsorción parcial de color en la columna (Pt/Co) | Adsorción total de color en la columna (PtCo) | % (Pt/Co) no adsorbido | % (Pt/Co) si adsorbido |
|----------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|--|---|------------------------|------------------------|
| 1              | 0.0          | 47                      | 47                                 | 0  | 4700                    | 376  | 376   | 0                      | 100                    |
| 2              | 16.6         | 100                     | 147                                | 0  | 14700                   | 800  | 1176  | 0                      | 100                    |
| 3              | 33.2         | 100                     | 247                                | 0  | 24700                   | 800  | 1976  | 0                      | 100                    |
| 4              | 49.8         | 100                     | 347                                | 0  | 34700                   | 800  | 2776  | 0                      | 100                    |
| 5              | 66.4         | 100                     | 447                                | 0  | 44700                   | 800  | 3576  | 0                      | 100                    |
| 6              | 83.0         | 100                     | 547                                | 0  | 54700                   | 800  | 4376  | 0                      | 100                    |
| 7              | 99.6         | 100                     | 647                                | 1  | 64700                   | 792  | 5168  | 1                      | 99                     |
| 8              | 116.2        | 100                     | 747                                | 2  | 74700                   | 784  | 5952  | 2                      | 98                     |
| 9              | 132.8        | 100                     | 847                                | 3  | 84700                   | 776  | 6728  | 3                      | 97                     |
| 10             | 149.4        | 100                     | 947                                | 3  | 94700                   | 776  | 7504  | 3                      | 97                     |
| 11             | 166.0        | 100                     | 1047                               | 3  | 104700                  | 776  | 8280  | 3                      | 97                     |
| 12             | 182.6        | 100                     | 1147                               | 3  | 114700                  | 776  | 9056  | 3                      | 97                     |
| 13             | 199.2        | 100                     | 1247                               | 5  | 124700                  | 760  | 9816  | 5                      | 95                     |
| 14             | 215.8        | 100                     | 1347                               | 5  | 134700                  | 760  | 10576   | 5                      | 95                     |
| 15             | 232.4        | 100                     | 1447                               | 5  | 144700                  | 760  | 11336   | 5                      | 95                     |
| 16             | 249.0        | 100                     | 1547                               | 6  | 154700                  | 752  | 12088   | 6                      | 94                     |
| 17             | 265.6        | 100                     | 1647                               | 6  | 164700                  | 752  | 12840   | 6                      | 94                     |
| 18             | 282.2        | 100                     | 1747                               | 6  | 174700                  | 752  | 13592   | 6                      | 94                     |
| 19             | 298.8        | 100                     | 1847                               | 6  | 184700                  | 752  | 14344   | 6                      | 94                     |
| 20             | 315.4        | 100                     | 1947                               | 6  | 194700                  | 752  | 15096   | 6                      | 94                     |
| 21             | 332.0        | 100                     | 2047                               | 6  | 204700                  | 752  | 15848   | 6                      | 94                     |

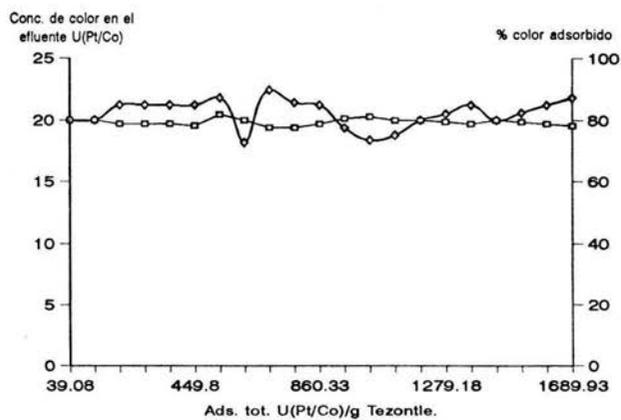
Gs = 6 mL/min cm<sup>2</sup>    Co = 100 U(Pt/Co)    Cf = 6 U(Pt/Co)

Figura 12 Adsorción de color U(Pt/Co) en la columna beta.

Onda de adsorción



Eficiencia de adsorción



◊ Con. effue. ◻ Eficiencia

promedio de  $79.37 \pm 1.1$  %, comparado con la columna alfa, la segunda es menos eficiente. Además de que no se presentan cambios bruscos en la adsorción siendo que la adsorción total fue de 1689.93 U(Pt/Co)/g tezontle (Tabla 5).

Al comparar los dos lechos adsorbentes (CAG del lirio acuático y tezontle), resulta evidente que el CAG-lirio presenta un 17.48 % mas de afinidad por el color, esto es debido a la característica morfológica de este con respecto al tezontle.

Retomando la teoría de las isothermas (adsorción física), al ir incrementando la cantidad de color en el afluente se van formando una mayor adsorción por lo que no sería extraño percibir la posible formación de multicapas (Brunauer *et al*, 1938 y Glastone, 1972).

Ahora bien en lo que fue la remoción de turbiedad, la columna alfa se comportó de manera semejante a la remoción de color, por lo que se encontró un  $98.12 \pm 0.42$  % de eficiencia promedio, lo que da una adsorción total de 4819.724 NTU/g CAG (Figura 13, Tabla 6).

Sin embargo, la columna beta en la misma prueba manifestó una adsorción total de 507.43 NTU/g Tezontle (Tabla 7), y una eficiencia promedio del  $75.78 \pm 9.76$  % (Figura 14).

Por lo tanto es claro que el CAG supera al tezontle en 22.34 % de eficiencia.

La sustancia adsorbida no penetra dentro de la red cristalina ni se disuelve en ella, sino que permanece totalmente sobre la superficie. Si el sólido es muy poroso y contiene muchos capilares como ocurre en el CAG, la sustancia adsorbida penetrará en estos intersticios.

DEGREMONT (1971), explica que la capacidad adsorptiva es diferente para cada tipo de material adsorbente, por lo tanto en ambas columnas (alfa y beta) durante la remoción de color intervienen fuerzas de índole físico como son las fuerzas de Van der Waals (fenómeno fácilmente reversible, resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida).

Pero la remoción de turbiedad en ambas columnas ocurre como lo afirma DEGREMONT (*op. cit.*), que esta se lleva a cabo por mecanismos de depositación como son la retención de partículas gruesas por la malla que forma el lecho, así mismo por fenómenos como la intercepción directa, la difusión por el movimiento Browniano y obviamente fuerzas de atracción.

Para Treyball (1980), un proceso de adsorción eficiente necesita una eliminación rápida de los compuestos en solución y una gran capacidad de adsorción. Depende de dos aspectos, como son la cinética y el equilibrio. El primero muestra el tiempo de contacto necesario entre adsorbente-solución y el segundo la capacidad adsorbente. Siendo entonces que la cinética es controlada en la mayoría de los casos por la difusión interna tomando en cuenta el hecho de que existe una

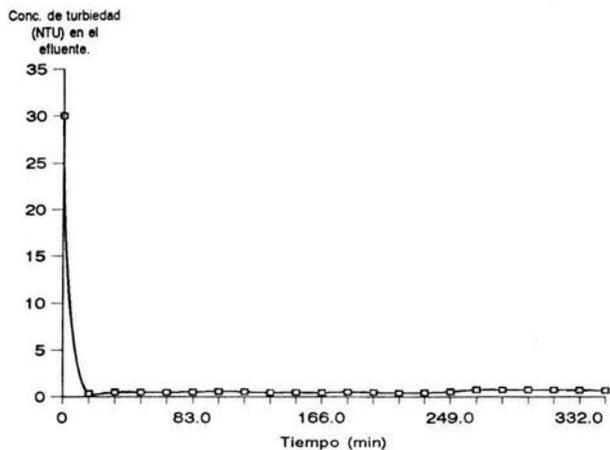
**Tabla 5. Adsorción de color (Pt/Co) por la columna beta (tezontle)**

| No. de muestra | Tiempo (min) | Volumen de muestra (mL) | Volumen acumulado de afluente (mL) | Concentración de color del efluente U(Pt/Co) | Alimentación C/11.1 min | Adsorción parcial de color en la columna U(Pt/Co) | Adsorción total de color en la columna U(Pt/Co) | % U(Pt/Co) no adsorbido | % U(Pt/Co) si adsorbido |
|----------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|---|---|-------------------------|-------------------------|
| 1              | 0.0          | 47                      | 47                                 | 20   | 4700                    | 39.08   | 39.08   | 20                      | 80.00                   |
| 2              | 11.1         | 100                     | 147                                | 20   | 14700                   | 83.16   | 122.24  | 20                      | 80.00                   |
| 3              | 22.2         | 100                     | 247                                | 21.22  | 24700                   | 81.89   | 204.13  | 21.22                   | 78.78                   |
| 4              | 33.3         | 100                     | 347                                | 21.22  | 34700                   | 81.89   | 286.02  | 21.22                   | 78.78                   |
| 5              | 44.4         | 100                     | 447                                | 21.22  | 44700                   | 81.89   | 367.91  | 21.22                   | 78.88                   |
| 6              | 55.5         | 100                     | 547                                | 21.22  | 54700                   | 81.89   | 449.80  | 21.22                   | 78.18                   |
| 7              | 66.6         | 100                     | 647                                | 21.81  | 64700                   | 81.27   | 531.07  | 21.81                   | 81.81                   |
| 8              | 77.7         | 100                     | 747                                | 18.18  | 74700                   | 85.05   | 616.12  | 18.18                   | 80.00                   |
| 9              | 88.8         | 100                     | 847                                | 22.42  | 84700                   | 80.64   | 696.76  | 22.42                   | 77.57                   |
| 10             | 99.9         | 100                     | 947                                | 21.42  | 94700                   | 81.68   | 778.44  | 22.42                   | 77.57                   |
| 11             | 111.0        | 100                     | 1047                               | 21.22  | 104700                  | 81.89   | 860.33  | 21.22                   | 78.78                   |
| 12             | 122.1        | 100                     | 1147                               | 19.39  | 114700                  | 83.79   | 944.12  | 19.39                   | 80.60                   |
| 13             | 133.2        | 100                     | 1247                               | 18.39  | 124700                  | 84.83   | 1028.95   | 18.78                   | 81.21                   |
| 14             | 144.3        | 100                     | 1347                               | 18.78  | 134700                  | 84.42   | 1113.38   | 20.00                   | 80.00                   |
| 15             | 155.4        | 100                     | 1447                               | 20   | 144700                  | 83.16   | 1196.54   | 20.00                   | 80.00                   |
| 16             | 166.5        | 100                     | 1547                               | 20.5   | 154700                  | 82.64   | 1279.18   | 20.50                   | 79.48                   |
| 17             | 177.6        | 100                     | 1647                               | 21.22  | 164700                  | 81.89   | 1361.07   | 21.22                   | 78.78                   |
| 18             | 188.7        | 100                     | 1747                               | 20   | 174700                  | 83.16   | 1444.23   | 20.00                   | 80.00                   |
| 19             | 199.8        | 100                     | 1847                               | 20.6   | 184700                  | 82.53   | 1526.76   | 20.60                   | 79.40                   |
| 20             | 210.9        | 100                     | 1947                               | 21.22  | 194700                  | 81.89   | 1608.65   | 21.22                   | 78.78                   |
| 21             | 222.0        | 100                     | 2047                               | 21.81  | 204700                  | 81.27   | 1689.93   | 21.81                   | 78.19                   |

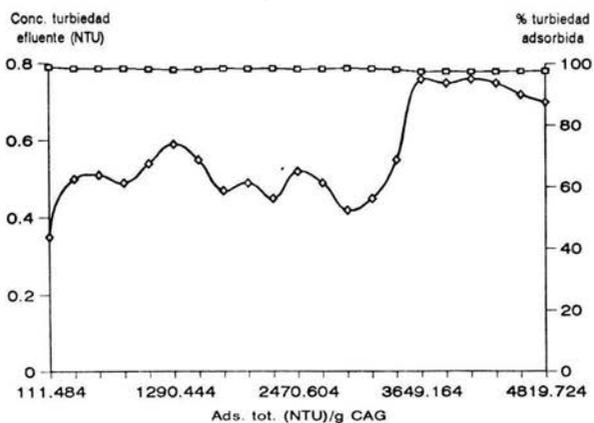
Gs = 9 mL/min cm<sup>2</sup> Co = 100 U(Pt/Co) Cf = 21.81 U(Pt/Co)

Figura 13 Adsorción dinámica de la turbiedad (NTU) en la columna alfa.

Onda de adsorción



Eficiencia de adsorción



◊ Con. efluente. ◻ Eficiencia

**Tabla 6. Adsorción de turbiedad U(NTU) por la columna alfa (CAG)**

| No. de muestra | Tiempo (min) | Volumen de muestra (mL) | Volumen acumulado de afluente (mL) | Concentración de color del efluente U(NTU) | Alimentación C/16.6 min | Adsorción parcial de turbiedad en la columna U(NTU) | Adsorción total de turbiedad en la columna U(NTU) | % U(NTU) no adsorbido | % U(NTU) si adsorbido |
|----------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|---|---|-----------------------|-----------------------|
| 1              | 0            | 47                      | 47                                 | 0.35                                       | 1410                    | 111.484   | 111.484   | 1.16                  | 98.83                 |
| 2              | 16.6         | 100                     | 147                                | 0.50                                       | 4410                    | 236.00  | 347.484   | 1.66                  | 98.33                 |
| 3              | 33.2         | 100                     | 247                                | 0.51                                       | 7410                    | 235.92  | 583.404   | 1.7                   | 98.33                 |
| 4              | 49.8         | 100                     | 347                                | 0.49                                       | 16309                   | 236.08  | 819.484   | 1.63                  | 98.36                 |
| 5              | 66.4         | 100                     | 447                                | 0.54                                       | 13410                   | 235.68  | 1055.164  | 1.8                   | 98.2                  |
| 6              | 83           | 100                     | 547                                | 0.59                                       | 16410                   | 235.28  | 1290.444  | 1.96                  | 98.04                 |
| 7              | 99.6         | 100                     | 647                                | 0.55                                       | 19410                   | 235.6   | 1526.04   | 1.83                  | 98.166                |
| 8              | 116.2        | 100                     | 747                                | 0.47                                       | 22410                   | 236.24  | 1762.284  | 1.56                  | 98.43                 |
| 9              | 132.8        | 100                     | 847                                | 0.49                                       | 25410                   | 236.08  | 1998.564  | 1.63                  | 98.36                 |
| 10             | 149.4        | 100                     | 947                                | 0.45                                       | 28410                   | 236.40  | 2234.764  | 1.5                   | 98.5                  |
| 11             | 166          | 100                     | 1047                               | 0.52                                       | 31410                   | 235.84  | 2470.604  | 1.73                  | 98.26                 |
| 12             | 182.6        | 100                     | 1147                               | 0.49                                       | 34410                   | 236.08  | 2706.684  | 1.63                  | 98.36                 |
| 13             | 199.2        | 100                     | 1247                               | 0.42                                       | 37410                   | 236.64  | 2943.324  | 1.4                   | 98.6                  |
| 14             | 215.8        | 100                     | 1347                               | 0.45                                       | 40410                   | 236.40  | 3179.964  | 1.5                   | 98.5                  |
| 15             | 232.4        | 100                     | 1447                               | 0.55                                       | 43410                   | 235.28  | 3415.244  | 1.83                  | 98.16                 |
| 16             | 249          | 100                     | 1547                               | 0.76                                       | 46410                   | 233.92  | 3649.164  | 2.53                  | 97.466                |
| 17             | 265.6        | 100                     | 1647                               | 0.75                                       | 49410                   | 234.0   | 3883.164  | 2.50                  | 97.5                  |
| 18             | 282.2        | 100                     | 1747                               | 0.76                                       | 52410                   | 233.92  | 4117.084  | 2.53                  | 97.46                 |
| 19             | 298.8        | 100                     | 1847                               | 0.75                                       | 55410                   | 234.0   | 4315.084  | 2.50                  | 97.5                  |
| 20             | 315.4        | 100                     | 1947                               | 0.72                                       | 58410                   | 234.24  | 4585.324  | 2.4                   | 97.6                  |
| 21             | 332.0        | 100                     | 2047                               | 0.70                                       | 61410                   | 234.4   | 4819.724  | 2.33                  | 97.66                 |

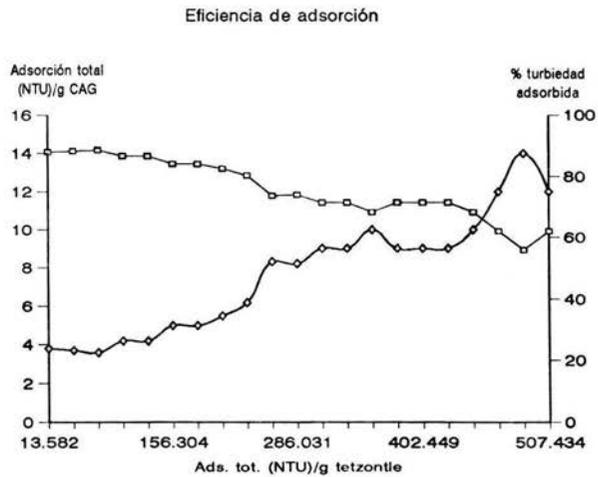
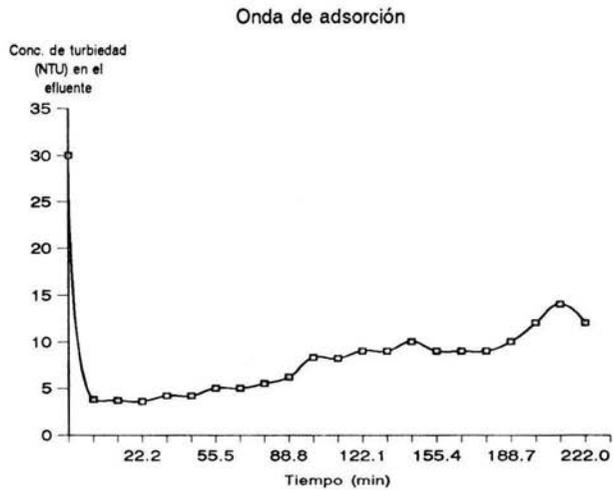
Gs = 6 mL/min cm<sup>2</sup> Co = 30 NTU Cf = 0.7 NTU

**Tabla 7. Adsorción de turbiedad U(NTU) por la columna beta (tezontle)**

| No. de muestra | Tiempo (min) | Volumen de muestra (mL) | Volumen acumulado de afluente (mL) | Concentración de color del efluente U(NTU) | Alimentación C/11.1 min | Adsorción parcial de turbiedad en la columna U(NTU) | Adsorción total de turbiedad en la columna U(NTU) | % U(NTU) no adsorbido | % U(NTU) si adsorbido |
|----------------|--------------|-------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|---|---|-----------------------|-----------------------|
| 1              | 0            | 47                      | 47                                 | 3.8  | 1485.2                  | 13.5821   | 13.582  | 12.02                 | 87.974                |
| 2              | 11.1         | 100                     | 147                                | 3.7  | 4645.2                  | 29.002  | 42.584  | 11.708                | 88.291                |
| 3              | 22.2         | 100                     | 247                                | 3.6  | 7805.2                  | 29.106  | 71.690  | 11.392                | 88.607                |
| 4              | 33.33        | 100                     | 347                                | 4.2  | 11965.2                 | 28.482  | 100.172   | 13.291                | 86.708                |
| 5              | 44.4         | 100                     | 447                                | 4.2  | 14125.2                 | 28.482  | 128.564   | 13.291                | 86.708                |
| 6              | 55.5         | 100                     | 547                                | 5  | 17285.2                 | 27.650  | 156.304   | 15.822                | 84.177                |
| 7              | 66.6         | 100                     | 647                                | 5  | 20445.2                 | 27.650  | 183.954   | 15.822                | 84.177                |
| 8              | 77.7         | 100                     | 747                                | 5.5  | 23605.2                 | 27.130  | 211.084   | 17.40                 | 82.594                |
| 9              | 88.8         | 100                     | 847                                | 6.2  | 26765.2                 | 26.403  | 237.487   | 19.620                | 80.37                 |
| 10             | 99.9         | 100                     | 947                                | 8.3  | 29925.2                 | 24.220  | 261.707   | 26.265                | 73.734                |
| 11             | 111.1        | 100                     | 1047                               | 8.2  | 33085.2                 | 24.324  | 286.031   | 25.949                | 74.0506               |
| 12             | 122.1        | 100                     | 1147                               | 9  | 36245.2                 | 23.492  | 309.523   | 28.481                | 71.518                |
| 13             | 133.2        | 100                     | 1247                               | 9  | 39405.2                 | 23.492  | 333.015   | 28.481                | 71.518                |
| 14             | 144.3        | 100                     | 1347                               | 10   | 42565.2                 | 22.45   | 355.468   | 31.64                 | 68.354                |
| 15             | 155.4        | 100                     | 1447                               | 9  | 45725.2                 | 23.492  | 378.957   | 28.481                | 71.518                |
| 16             | 166.5        | 100                     | 1547                               | 9  | 48885.2                 | 23.492  | 402.449   | 28.481                | 71.518                |
| 17             | 177.6        | 100                     | 1647                               | 9  | 52045.2                 | 23.492  | 425.947   | 28.481                | 71.518                |
| 18             | 188.7        | 100                     | 1747                               | 10   | 55205.2                 | 22.45   | 448.391   | 31.64                 | 68.354                |
| 19             | 199.8        | 100                     | 1847                               | 12   | 58365.2                 | 20.374  | 468.765   | 37.974                | 62.025                |
| 20             | 210.9        | 100                     | 1947                               | 14   | 61525.2                 | 18.295  | 487.060   | 44.303                | 55.696                |
| 21             | 222.0        | 100                     | 2047                               | 12   | 64685.2                 | 20.374  | 507.434   | 37.974                | 62.025                |

Gs = 9 mL/min cm<sup>2</sup> Co = 30 NTU Cf = 12 NTU

Figura 14 Adsorción de turbiedad (NTU) en la columna beta.



◇ Con. eflue. ◻ Eficiencia

velocidad relativa entre el fluido y el sólido, abajo de la cual el mecanismo controlante es la difusión en la partícula externa. Es así que el tamaño de las partículas afecta sólo la velocidad bajo estas consideraciones, desde el punto de vista de la eficiencia de adsorción, es mejor utilizar partículas pequeñas, sin embargo desde el punto de vista económico, resulta más conveniente utilizar partículas grandes.

Váldez (1981) y Tapia (1978), enuncian que el CAG encuentra aplicación cuando se requiere purificar cantidades de líquido con relativa baja impureza. Esta operación según Sarmiento (1985), tiene como resultado condiciones en estado estacionario, en donde las composiciones del efluente cambian con el tiempo. Es así que al evaluar la columna alfa-beta se tomaron dos criterios para obtener el punto de ruptura:

El primero que se apoya en los procesos de adsorción, éste se manifiesta como el punto en donde ocurre un aumento brusco de la concentración del soluto en el efluente (Treyball, *op. cit* y Sarmiento *op. cit.*).

El segundo se basa, como lo afirma Petrokva *et al.* (1994), en la calidad del efluente al momento de rebasar los límites permisibles para agua potable. El Diario Oficial de la Federación (1994), propone 15 U(Pt/Co) para el color y 5 NTU para la turbiedad.

Por lo tanto al observar la Tabla 8 para la remoción de color se observa que en promedio la columna alfa-beta muestra una eficiencia del  $93.48 \pm 5.99$  % con una adsorción total de 23779 U(Pt/Co)/g CAG-Tez.

Así mismo en la Figura 15 se aprecia el punto de ruptura a las 11 h 8 min (Volumen acumulado 36 L) de operación, tomando en cuenta el primer criterio con un ascenso de la concentración de color en el efluente de 3.62 a 6.13 U(Pt/Co).

Al aplicar la ecuación 13 resulto que la longitud del lecho útil (Zs) de 21.26 cm lo que puede indicar que dentro de la columna sólo se ha utilizado ésta y que la longitud del lecho sin utilizar (LUB) fue de 8.54 cm, denotando que o no se ha utilizado o que no es necesaria en la columna.

Por el otro lado al aplicar el segundo criterio se expresa una ruptura aproximadamente a un volumen de 83.5 L a las 25 h 48 min de operación con una concentración de 15.4 U(Pt/Co).

En el caso de la remoción de turbiedad por la misma columna se manifestó una adsorción total de 23,779 NTU/g CAG-Tetz con una eficiencia promedio de  $89.66 \pm 6.28$  % (Tabla 9).

Al aplicar el primer criterio se evaluó que ocurre el punto de ruptura al pasar 41.8 L de volumen acumulado a las 12 h 54 min de uso debido a que existe un incremento de 2 a 3.75 NTU en el efluente. Resulta entonces que la longitud del

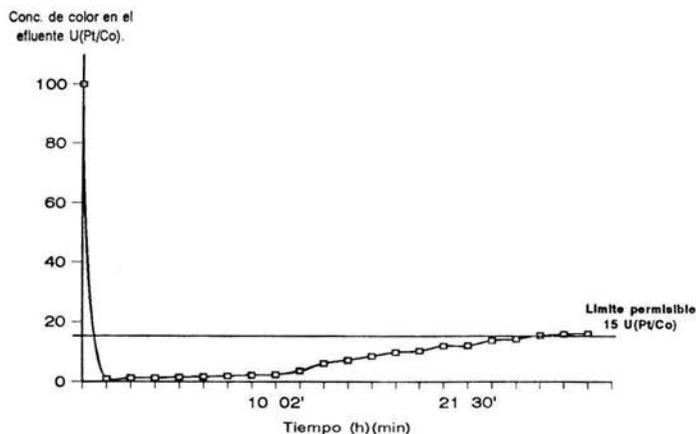
**Tabla 8. Adsorción de color U(Pt/Co) columna alfa-beta.**

| No. de muestra | Tiempo (h) (min) | Volumen de muestra (L) | Volumen acumulado de afluente (L) | Concentración de color del efluente U(Pt/Co) | Alimentación C/54.25/L | Adsorción parcial de color en la columna U(Pt/Co)/g CAG-TETZ/L | Adsorción total de color en la columna U(Pt/Co)/g CAG-TETZ/L | % U(Pt/Co) no adsorbido | % U(Pt/Co) si adsorbido |
|----------------|------------------|------------------------|-----------------------------------|--|------------------------|--|--|-------------------------|-------------------------|
| 1              | 17'              | 1                      | 1                                 | 0.88   | 100                    | 0.254  | 0.254  | 0.880                   | 99.120                  |
| 2              | 1 26'            | 5                      | 6                                 | 1.22   | 600                    | 1.265  | 1.519  | 1.226                   | 98.774                  |
| 3              | 2 56'            | 5                      | 11                                | 1.24   | 1100                   | 1.265  | 2.784  | 1.245                   | 98.755                  |
| 4              | 4 18'            | 5                      | 16                                | 1.53   | 1600                   | 1.261  | 4.045  | 1.535                   | 98.465                  |
| 5              | 5 44'            | 5                      | 21                                | 1.66   | 2100                   | 1.260  | 5.305  | 1.666                   | 98.334                  |
| 6              | 7 10'            | 5                      | 26                                | 1.89   | 2600                   | 1.252  | 6.557  | 2.231                   | 97.679                  |
| 7              | 8 36'            | 5                      | 31                                | 2.19   | 3100                   | 1.253  | 7.810  | 2.392                   | 97.608                  |
| 8              | 10 02'           | 5                      | 36                                | 2.36   | 3600                   | 1.251  | 9.061  | 2.687                   | 97.313                  |
| 9              | 11 08'           | 5                      | 41                                | 3.62   | 4100                   | 1.235  | 10.296   | 3.620                   | 96.38                   |
| 10             | 12 54'           | 5                      | 46                                | 6.13   | 4600                   | 1.202  | 11.498   | 3.823                   | 96.18                   |
| 11             | 14 20'           | 5                      | 51                                | 7.22   | 5100                   | 1.188  | 12.661   | 4.204                   | 95.80                   |
| 12             | 15 46'           | 5                      | 56                                | 8.54   | 5600                   | 1.171  | 13.787   | 4.24                    | 95.76                   |
| 13             | 17 12'           | 5                      | 61                                | 9.86   | 6100                   | 1.15   | 14.937   | 4.28                    | 95.72                   |
| 14             | 18 38'           | 5                      | 66                                | 10.34  | 6600                   | 1.148  | 16.085   | 4.93                    | 95.07                   |
| 15             | 20 04'           | 5                      | 71                                | 11.95  | 7100                   | 1.128  | 17.213   | 5.41                    | 94.59                   |
| 16             | 21 30'           | 5                      | 76                                | 12.05  | 7600                   | 1.126  | 18.339   | 8.14                    | 91.86                   |
| 17             | 22 56'           | 5                      | 81                                | 13.74  | 8100                   | 1.105  | 19.444   | 10.550                  | 89.450                  |
| 18             | 24 22'           | 5                      | 86                                | 14.28  | 8600                   | 1.098  | 20.542   | 12.960                  | 87.040                  |
| 19             | 25 48'           | 5                      | 91                                | 15.45  | 9100                   | 1.083  | 21.625   | 15.450                  | 84.550                  |
| 20             | 27 14'           | 5                      | 96                                | 15.86  | 9600                   | 1.078  | 22.703   | 19.660                  | 80.340                  |
| 21             | 28 40'           | 5                      | 101                               | 16.00  | 10100                  | 1.076  | 23.779   | 19.98                   | 80.020                  |

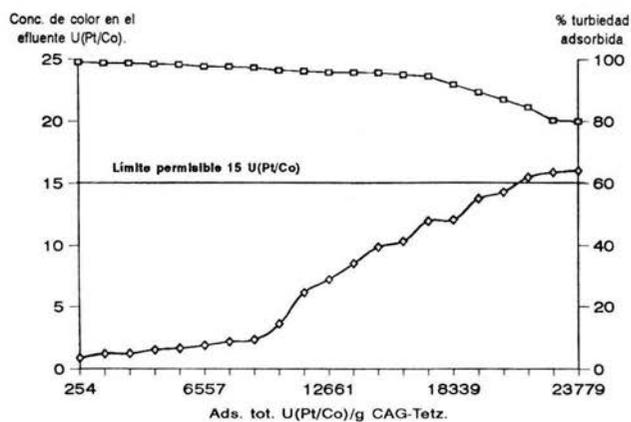
Gs: 54 mL/min cm<sup>2</sup> Co: 100 U(Pt/Co) Cf: 16 U(Pt/Co) Φb: 668 min Zs: 21.46 cm δs: 5.38 g/cm<sup>3</sup> Xt: 23779 U(Pt/Co)/g Xo: 0 U(Pt/Co)/g LUB: 8.54 cm Z: 30 cm

Figura 15 Adsorción de color U(Pt/Co)  
en la columna alfa-beta.

Onda de adsorción



Eficiencia de adsorción



◇ Con. eflue. □ Eficiencia

**Tabla 9. Adsorción de turbiedad (NTU) en la columna alfa-beta.**

| No. de muestra | Tiempo (h) (min) | Volumen de muestra (L) | Volumen acumulado de afluente (L) | Concentración de turbiedad del efluente (NTU) | Alimentación C/54.25 min/L | Adsorción parcial de turbiedad en la columna NTU/g CAG-Tetz/L | Adsorción total de turbiedad en la columna NTU/g CAG-Tetz/L | % NTU no adsorbido | % NTU si adsorbido |
|----------------|------------------|------------------------|-----------------------------------|---|----------------------------|---|---|--------------------|--------------------|
| 1              | 17'              | 1                      | 1                                 | 0.65  | 30                         | 0.075   | 0.075   | 2.16               | 97.84              |
| 2              | 1 26'            | 5                      | 6                                 | 0.63  | 180                        | 0.376   | 0.451   | 2.10               | 97.90              |
| 3              | 2 56'            | 5                      | 11                                | 0.63  | 330                        | 0.376   | 0.827   | 2.10               | 97.90              |
| 4              | 4 18'            | 5                      | 16                                | 0.975   | 480                        | 0.371   | 1.198   | 3.25               | 96.75              |
| 5              | 5 44'            | 5                      | 21                                | 0.885   | 630                        | 0.373   | 1.571   | 2.95               | 97.05              |
| 6              | 7 10'            | 5                      | 26                                | 1.035   | 780                        | 0.371   | 1.942   | 3.45               | 96.55              |
| 7              | 8 36'            | 5                      | 31                                | 1.69  | 930                        | 0.3627  | 2.3047  | 5.63               | 94.37              |
| 8              | 10 2'            | 5                      | 36                                | 1.90  | 1080                       | 0.3600  | 2.664   | 6.33               | 93.67              |
| 9              | 11 8'            | 5                      | 41                                | 1.96  | 1230                       | 0.3593  | 3.023   | 6.53               | 93.47              |
| 10             | 12 54'           | 5                      | 46                                | 2.00  | 1380                       | 0.3587  | 3.382   | 6.66               | 93.34              |
| 11             | 14 20'           | 5                      | 51                                | 3.75  | 1530                       | 0.3360  | 3.718   | 12.5               | 87.50              |
| 12             | 15 46'           | 5                      | 56                                | 3.93  | 1680                       | 0.3340  | 4.052   | 13.1               | 86.90              |
| 13             | 17 12'           | 5                      | 61                                | 4.08  | 1830                       | 0.3320  | 4.384   | 13.6               | 86.4               |
| 14             | 18 38'           | 5                      | 66                                | 4.15  | 1980                       | 0.3310  | 4.715   | 13.83              | 86.17              |
| 15             | 20 4'            | 5                      | 71                                | 4.65  | 2130                       | 0.3240  | 5.039   | 15.5               | 84.50              |
| 16             | 21 30'           | 5                      | 76                                | 4.89  | 2280                       | 0.3210  | 5.360   | 16.3               | 83.70              |
| 17             | 22 56'           | 5                      | 81                                | 5.29  | 2430                       | 0.3160  | 5.676   | 17.63              | 82.37              |
| 18             | 24 22'           | 5                      | 86                                | 5.38  | 2580                       | 0.3150  | 5.991   | 17.93              | 82.07              |
| 19             | 25 48'           | 5                      | 91                                | 5.46  | 2730                       | 0.3140  | 6.305   | 18.16              | 81.83              |
| 20             | 27 14'           | 5                      | 96                                | 5.52  | 2880                       | 0.3130  | 6.618   | 18.4               | 81.60              |
| 21             | 28 40'           | 5                      | 101                               | 5.67  | 3030                       | 0.3110  | 6.929   | 18.90              | 81.10              |

Gs: 54 mL/min cm<sup>2</sup> Co: 30 NTU Cf: 5.67 NTU Φb: 774 min Zs: 27.25 cm δs: 5.38 g/cm<sup>3</sup> Xt: 6929 NTU/g Xo: 0 NTU/g LUB: 2.75 cm Z: 30 cm

lecho útil al aplicar la ecuación 13 fue de 27.25 cm y el LUB de 2.75 cm (Figura 16).

Pero al aplicar el criterio de calidad utilizado por Petrokva *et. al.*, (*op. cit.*), el punto de ruptura se manifestó a las 22 h 56 min (81 L) aproximadamente. Al momento que ocurre el punto de ruptura de acuerdo al criterio de calidad es necesario llevar a cabo un retrolavado, con el fin de regenerar su capacidad de filtración.

Cabe aclarar que aun cuando la columna alfa-beta presenta un punto de ruptura casi a la mitad del ciclo de operación desde el punto de vista adsorptivo, la columna rebasa la normatividad establecida en el Diario Oficial de la Federación (1994), casi al duplicar el volumen filtrado. Además que las soluciones utilizadas como afluente poseen un 600 % más de concentración que la permisible para agua potable por lo que sería conveniente evaluar las columnas bajo esta perspectiva.

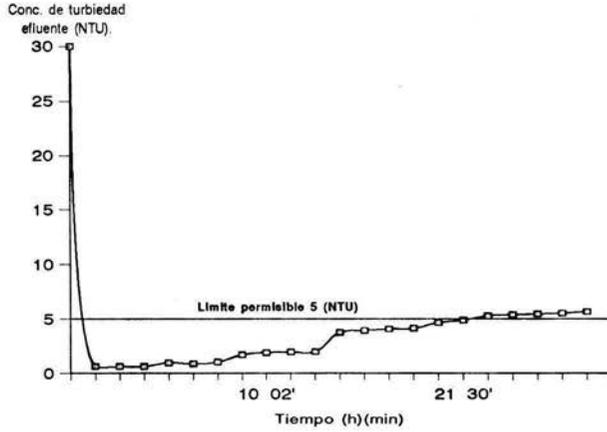
El comportamiento de la columna alfa-beta para la remoción de color y turbiedad lo explica Treyball (1980), de la siguiente manera (Figura 17):

La onda de adsorción, considérese el caso de una solución binaria, ya sea gaseosa o líquida, que contiene un soluto que será fuertemente adsorbido en concentración  $C_0$ . El fluido se va a pasar continuamente a través de un lecho relativamente profundo de adsorbente que al principio está libre de adsorbato. La capa superior del sólido, en contacto con la fuerte solución entrante, adsorbe al principio el soluto rápida y efectivamente; el poco remanente de soluto en la solución queda prácticamente eliminado por las capas de sólido en la parte inferior del lecho. El efluente del fondo del lecho está prácticamente libre de soluto como en  $C_0$ , en la parte inferior de la Figura 17. La distribución de adsorbato en el lecho sólido se indica en la parte superior de esta Figura, en a, en donde la densidad relativa de las líneas horizontales en el lecho sirve para indicar la concentración relativa de adsorbato. La capa superior del lecho está prácticamente saturada; la mayor parte de la adsorción tiene lugar en una zona de adsorción relativamente estrecha, en la cual la concentración cambia rápidamente, como se muestra. Mientras continúa fluyendo la solución, la zona de adsorción se mueve hacia abajo como una onda, con una rapidez generalmente mucho más lenta que la velocidad lineal del fluido a través del lecho. Después de cierto tiempo, como en b, en la Figura, aproximadamente la mitad del lecho está saturada con soluto, pero la concentración del efluente  $C_b$  es aún básicamente cero.

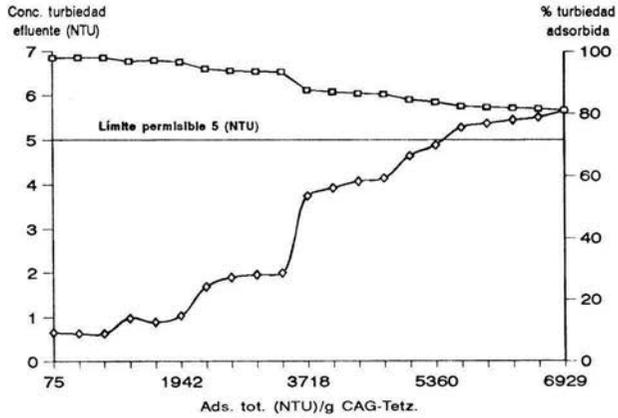
En c, la parte inferior de la zona de adsorción ha alcanzado el fondo del lecho y la concentración del soluto en el efluente ha aumentado bruscamente hasta un valor apreciable  $C_c$ . Se dice que el sistema ha alcanzado el punto de ruptura. Ahora la concentración de soluto en el efluente aumenta con rapidez al pasar la zona de adsorción a través del fondo del lecho; en d ha alcanzado básicamente el valor final  $C_0$ . La parte de la curva de concentración del efluente entre las posiciones c y d se conoce como la curva de ruptura. Si la solución continua fluyendo ocurre poca adsorción adicional puesto que el lecho, para todos los propósitos prácticos, está completamente en equilibrio con la solución de alimentación.

Figura 16 Adsorción de turbiedad (NTU) en la columna alfa-beta.

Onda de adsorción

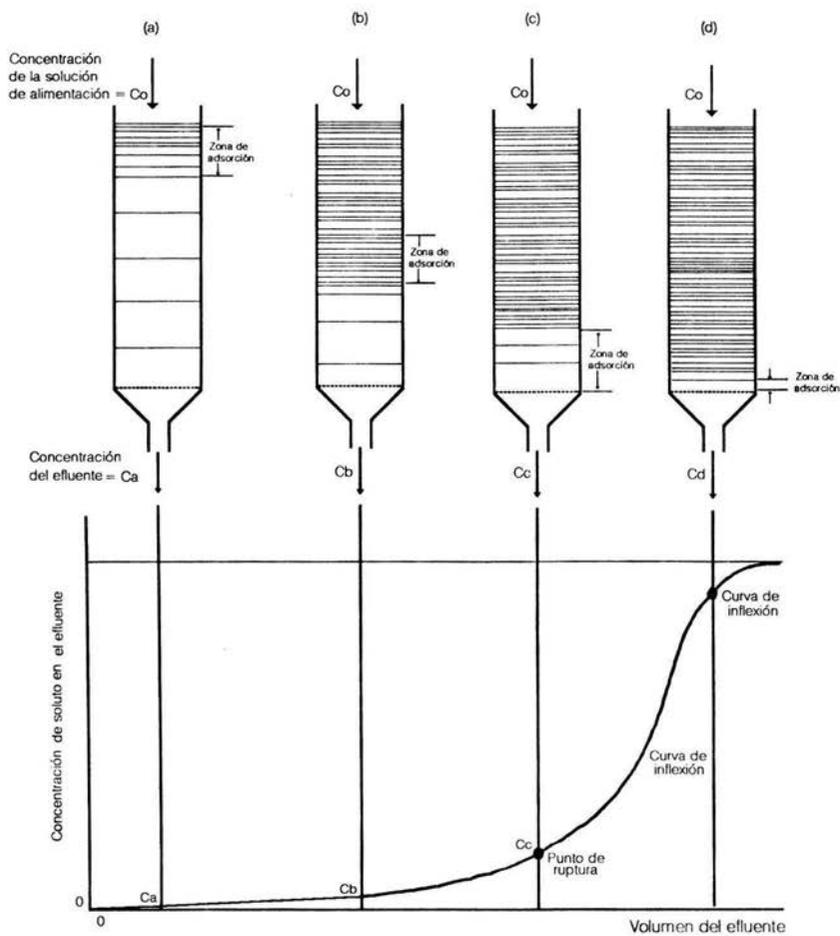


Eficiencia de adsorción



◆ Con. eflue. □ Eficiencia

Figura.17 Modelo de una onda de adsorción ideal.



Fuente: Treyball, 1980.

De esta manera se observa en las Figuras 15 y 16 que la onda de adsorción se asemeja a una curva sigmoideal, que como lo explica el mismo Treyball (*op. cit.*) con una pendiente relativamente plana, denotando una adsorción relativamente lenta.

Al comparar la eficiencia de la columna alfa-beta (que posee un lecho de carbón activado granular de lirio y tezontle para la remoción de la turbiedad y el color) con las obtenidas por Rosales *et al* (1991) y las de Cuevas y Corona (1990), cuando evaluaron los filtros domésticos marca Turmix, Ogdhen, Junghanns, Aquamax, Chicago y Filpot, estos manifiestan que su evaluación mostró una remoción de color de aproximadamente 95 % en promedio al hacer pasar 1000 L de agua con una concentración de 3 U(Pt/Co) y del 66 % con el mismo volumen de influente a una concentración de 20 NTU. En cambio la remoción de la columna alfa-beta es similar, sólo que se hicieron pasar 100 L pero a una concentración de 100 U(Pt/Co) y 30 NTU.

La altura promedio de dichas columnas es de 30 a 40 cm en promedio pero no muestran en sus trabajos realizar curvas de saturación del lecho, por lo que no especifican si en realidad utilizan toda la longitud de la columna. En cambio en la columna alfa-beta, para tener una adsorción eficiente de color (100 U(Pt/Co) y turbiedad (30 NTU), el calculo teórico usando la ecuación 14 indica que no se necesita una columna con 30 cm de longitud, sino una columna con  $24.335 \pm 4.09$  cm lo cual permite un ahorro en el lecho filtrante.

Así que a medida que los contaminantes suspendidos son removidos por el filtro el espacio vacío para el flujo decrece y la velocidad a través de los huecos se reduce, aún cuando se mantuvo un volumen constante se observó un cambio en la calidad del agua del efluente cuando el lecho se deteriora (IMTA, 1992).

Es así que tenemos dos tiempos, el tiempo de ruptura dado por la adsorción ( $T_1$ ) y el tiempo (volumen) necesario durante el cual se obtiene un agua de calidad deseada ( $T_2$ ).

Los factores que influyen sobre  $T_1$  y  $T_2$  son: la granulometría del material filtrante, la velocidad de filtración y la altura del lecho filtrante (Z).

De acuerdo a Alarcón (1994), el filtro ideal será aquel en donde los dos tiempos son iguales. Además menciona que la tecnología de la filtración depende de la calidad y la cantidad de agua a tratar así mismo del grado deseado de las materias suspendidas en el filtrado.

En este sentido se puede decir que la columna alfa-beta sería atractiva para la remoción de turbiedad y color que son propiedades estéticas, así mismo la AWWA (1971), indica que la turbiedad como consecuencia de partículas suspendidas como arcillas, son capaces de alojar en sus intersticios a bacterias que afectan la salud del consumidor, ya que a través de ésta se pueden contraer enfermedades infecto-contagiosas del tracto digestivo que dan una mayor aceptación del agua para su uso, en este sentido, la dotación de los habitantes del D.F. es de 292 L/hab/día, de este caudal sólo se utiliza para la ingesta directa menos de 1 % en el sistema

doméstico, la incorporación de contaminantes al agua se puede dar según DGCOH-DDF (1990), en 7% veces para cisternas y tinacos, debido a que no existe una operación y mantenimiento adecuado resultando entonces atractiva la utilización de la columna alfa-beta. Cabe señalar que existen otros factores como la calidad del aire, calidad de los alimentos, hábitos higiénicos, nivel nutricional entre otros que condicionan las etiologías mencionadas.

#### **Factibilidad económica.**

La parte económica considera obtener los costos de procesar el lirio acuático a carbón activado. Este análisis incluye la fase operativa de extracción, transporte y procesamiento (Gutiérrez, Uribe y Franco, 1994).

En la fase de extracción se considera utilizar maquinaria provista de un equipo de cortado y cosechado la cual incluye una combinación de lanchón, cortadora y plataforma.

Las ventajas de la cosecha es la no restricción del uso del agua, reducción de la tasa de eutroficación/sedimentación y desde luego el aprovechar las malezas extraídas.

Para evaluar los costos de extracción mecánica se consideró la cosechadora marca Aquamarine H10-800, esto debido al "grado de madurez" del modelo, es decir un mayor número de aplicaciones registradas a nivel nacional e internacional.

El costo del cosechado mecánico se compone de la evaluación de la maquina, capital inicial para la compra o renta de la maquinaria, costos de operación, mantenimiento y disposición final (IMTA-DHTA, 1994).

En la Tabla 10, se manifiestan algunas características de la cosechadora, así mismo de los costos para cada uno de los rubros anteriores. Sobresale el aspecto de utilizar o no barcasas, debido a lo cual se modifican los costos de extracción. Resulta entonces que al emplear las barcasas el costo es de N\$ 28,898 y sin barcasas este se incrementa a N\$ 41,635 ambos por hectárea, entonces la tonelada de lirio acuático costaría N\$ 144.49 y N\$ 208.00 respectivamente.

La diferencia de casi N\$ 65 es debida a que al utilizar los lanchones se reduce el tiempo perdido entre el cosechado y la disposición final por lo que se incrementa la tasa de cosecha de 0.012 a 0.15 ha/h.

Del mismo modo se considera que el transporte de la zona de cosecha a la de procesamiento sea de 5 km, por lo que el flete sería N\$ 4,115 por ha. Este incluye una reducción del volumen en 50 % por compactación.

El procesamiento del lirio acuático fresco como se mencionó en un inicio es debido a que éste posee 96 % de agua y es preciso escurrirlo y desecarlo por lo que se recomienda extenderlo al sol por 48-60 h considerando un 5 % de incremento al

**Tabla 10. Características del equipo de cosechado (Aquamarine H10-800) y estimación del costo unitario.**

| <b>CARACTERISTICAS</b>   |   |                     |
|--|---|---------------------|
| <b>1. Capacidad</b>  |   |                     |
| 1.1 Cobertura superficial (ha/d) 43 kg/m <sup>2</sup>                |   | 0.375               |
| 1.2 Ancho de barrido (m)   |   | 3.0                 |
| 1.3 Alcance de profundidad (m)                                       |   | 1.5                 |
| 1.4 Velocidad (km/hr)  |   | 5                   |
| 1.5 Carga (ton)  |   | 6.4                 |
| 1.6 Fuente Motriz  |   | Diesel              |
| 1.7 Potencia (HP)  |   | 55.5                |
| <b>2. Dimensiones</b>  |   |                     |
| 2.1 Ancho (m)  |   | 4.5                 |
| 2.2 Largo (m)  |   | 12.7                |
| 2.3 Calado (m)   |   | 0.66                |
| 2.4 Peso (ton)   |   | 7.1                 |
| <b>3. Características de los componentes</b>                         |   |                     |
| 3.1 Sistema de corte   | Con cuchillas horiz y vert. recíprocamente de 4". |                     |
| 3.2 Mecanismo de recolección   | Con cabezal de cosechado móvil.                   |                     |
| 3.4 Contenedor interno   | Móvil   |                     |
| 3.5 Transportador  | Articulado o de bandas                            |                     |
| <b>COSTOS</b>  |   |                     |
|  | <b>Sin barcazas</b>                               | <b>Con barcazas</b> |
| Biomasa del lirio (kg/m <sup>2</sup> )                               |   | 40                  |
| Masa por ha (ton/ha)   |   | 400                 |
| Densidad volumétrica del lirio (kg/m <sup>3</sup> )                  |   | 192                 |
| Volumen por hectárea (m <sup>3</sup> /ha)                            |   | 2,083               |
| Cálculo del costo de la depreciación y mantenimiento de cosechadoras |   |                     |
| Costo de una cosechadora (N\$)                                       | 505,000   | 505,000             |
| Vida útil (horas)  | 20,000  | 10,000              |
| Tasa de cosechamiento (ha/h)   | 0.012   | 0.15                |
| Costo por hectárea (N\$/ha)  | 2,104   | 337                 |
| Tiempo de cosechado/ha (horas)                                       | 83.33   | 6.67                |
| Costo de op. y mto. (N\$)  | 425   | 425                 |
| Costo de op. y mto. por ha (N\$/ha)                                  | 35,417  | 2,833               |
| Costo de las barcazas (N\$/barcazas)                                 |   | 252,500             |
| Vida útil de barcazas (horas)  |   | 10,000              |
| Capacidad de carga y traslado (kg/ha)                                |   | 4,400               |
| (ha/h)   |   | 0.011               |
| Cálculo del costo del transporte del lirio                           |   |                     |
| Distancia al sitio de depósito (km)                                  | 5   | 5                   |
| Capacidad de carga (m <sup>3</sup> /camión)                          | 6   | 6                   |
| Costo del transporte (N\$/flete/m <sup>3</sup> )                     | 3.95  | 3.95                |
| Reducción del volumen por compactación (%)                           | 50  | 50                  |
| Volumen a transportar por ha (m <sup>3</sup> /camión)                | 1,042   | 1,042               |
| No. de fletes por ha (fletes/ha)                                     | 174   | 174                 |
| Costo del flete (N\$/ha)   | 4,115   | 4,115               |
| <b>Costo por hectárea (N\$/ha)</b>                                   | <b>41,635.00 *</b>                                | <b>28,898.00 *</b>  |

\* Enero 1994

costo por hectárea para la operación, siendo que el incremento es dado por el personal y maquinaria que se van a utilizar para dicha operación, esta acción se puede llevar a cabo *in situ* en la zona de cosecha.

Al entrar en el proceso de fabricación, Sapien (1983), considera que dicho proceso debe incluir mezclado, activación y carbonización (en este caso se lleva a cabo en una etapa como se vio en la obtención del carbón activado), enfriamiento además de lavado, secado, selección y empaque.

Es así que para obtener un kilogramo de carbón activado se necesita como materia prima 208 kg de lirio fresco que al secarlo serían 8.33 kg (lirio seco), así como de 0.00833 kg de hidróxido de calcio grado reactivo para mantener una proporción de 0.1 con respecto al lirio seco (Tabla 11). Extrapolándose los datos a una tonelada se necesitaría 208 toneladas de lirio (aproximadamente 0.625 ha a una biomasa de 40 kg/m<sup>2</sup>) para obtener aproximadamente 1 ton de carbón activado.

En la Tabla 11 se muestran las cantidades necesarias para obtener un kg de carbón activado y los costos por kg de materia prima así como su costo total. Este precio varía como se menciona anteriormente, por el método de extracción, por lo que al utilizar las barcasas este es de N\$ 31.70. Es evidente la importancia de la extracción y el transporte, representando en conjunto el 92 % del costo total.

Este costo al compararlo con los carbones activados ofrecidos por las compañías Merck y Sigma con un tamaño de malla de 8 X 20 muestran un costo de N\$ 229.4 y N\$ 264.00 por kg respectivamente, que es más al obtenido en el carbón activado del lirio acuático, sin embargo estos tipos de carbón ofrecido son de naturaleza más pura y evaluados con otros contaminentes (Tabla 11). Sin embargo, al comparar el carbón de lirio con el ofrecido por Clarimex denotamos que el segundo cuesta N\$ 10.00 el kg, usándose principalmente en procesos industriales y resultando inferior en cerca de N\$ 22.00 al producido del lirio acuático, pero el carbón de Clarimex es menor en su capacidad adsorbtiva y por ende en su área específica.

El costo del carbón activado es elevado pero se tiene que considerar que en una etapa inicial se considera el comprar la maquinaria de extracción, es así que al transcurrir el tiempo la misma sólo incluirá un costo por mantenimiento y operación, lo cual se vera reflejado en la producción del carbón activado y por lo tanto el costo se verá disminuido.

Ahora bien, en el costo del carbón activado del lirio no se considera el posible precio por la inversión en la planta de procesamiento.

La FAO (1983), evalúa algunos métodos simples para fabricar carbón vegetal a partir de la leña de una manera doméstica, siendo posible adaptar alguno de ellos para la fabricación del carbón en la misma zona de cosecha.

**Tabla 11. Estimación y comparación de los costos en la elaboración de carbón activado a partir del lirio acuático.**

| CONCEPTO                                  | CANTIDAD REQUERIDA PARA 1 kg DE CARBON ACTIVADO | PRECIO UNITARIO DE LA MATERIA PRIMA (N\$/kg) | COSTO TOTAL (N\$) |
|---|---|--|-------------------|
| <b>LIRIO ACUATICO FRESCO</b>              |   |  |                   |
| a. Cosecha sin barcazas                   | 208 kg  | a. 0.20                                      | a. 41.60          |
| b. Cosecha con barcazas                   |   | b. 0.14                                      | b. 29.12          |
| <b>LIRIO ACUATICO SECO</b>                |   |  |                   |
| Incremento del 5 % al costo de extracción | 8.33 kg   | a. 0.01                                      | a. 2.5            |
| Incluye: extendido y secado al sol        |   | b. 0.007                                     | b. 1.75           |
| <b>ACTIVANTE</b>                          | 0.0833 kg                                       | 100  | 0.833             |
| Hidróxido de calcio                       |   |  |                   |
|   |   | <b>COSTO TOTAL (N\$/kg DE CA)</b>            | <b>a. 44.19</b>   |
|   |   |  | <b>b. 31.70</b>   |

**Costo de algunos tipos de carbones activados comerciales**

| Marca de carbón activado | Características  | Costo (N\$/kg de CA) |
|--------------------------|--|----------------------|
| <b>Merck</b>             | - Tamaño de partícula 80 x 20<br>- Utilizado principalmente en laboratorio | <b>229.40</b>        |
| <b>Sigma</b>             | - Se considera como reactivo   | <b>264.00</b>        |
| <b>Clarimex</b>          | - Tamaño de 8 x 20.<br>- Considerado para su utilización en la industria.  | <b>10.00</b>         |

## CONCLUSIONES

- Es factible utilizar el lirio acuático como materia prima en la fabricación de carbón activado, el carbón obtenido ofrece buenas perspectivas como adsorbente por lo que es posible utilizarlo en el tratamiento de aguas de tipo doméstico y más cuando el lirio acuático se encuentra en gran abundancia en varios cuerpos de agua
- El rendimiento del carbón activado fue de 0.54 % respecto a la base fresca y del 12 % a la base seca de lirio acuático lo cual indica un rendimiento pobre y esto debido a que la fibra del lirio es hemicelulosa. La celulosa ofrece un 8 % de rendimiento mayor.
- El carbón activado a partir del lirio acuático presenta una adsorción de 87.7 mg AM/g CA y un área específica de 180 m<sup>2</sup>/g.
- La adsorción del CA-lirio para el azul de metileno es superior a la de los carbones Darco, Sigma y Clarimex pero menor a los carbones de las marcas Merck y Norit por lo que su calidad es intermedia.
- Las isothermas de adsorción muestran una mejor relación con la ecuación de Freudlich que con la de Langmuir.
- La adsorción en primer término ocurre en monocapa, semejante a la descrita por Langmuir, siendo ésta de forma localizada, para después comportarse en multicapas, característica de una adsorción física debida a fuerzas electrostaticas como las de Van der Waals y por lo tanto de naturaleza no localizada lo que indica una superficie heterogénea o irregular es decir que conforme aumenta la concentración del adsorbato aumenta la capacidad adsortiva del adsorbente hasta llegar a una saturación.
- Los valores de eficiencia de remoción son mayores en la columna de carbón activado de lirio para el color (96.85 %) y la turbiedad (98.12 %). La remoción de la columna con tezontle fue satisfactoria, denotándose que el tezontle es capaz de removerla turbiedad en 75.78 % y el color en 79.37 %.
- Las eficiencias de adsorción de la columna carbón activado de lirio-tezontle para color y turbiedad fueron del  $93.48 \pm 5.99$  % y  $89.66 \pm 6.28$  % respectivamente y la longitud del lecho útil para color (100 U (Pt/Co)) y turbiedad (30 NTU) fue de 21.26 cm y 27.25 cm por lo que un filtro con estas alturas es suficiente de acuerdo al modelo teórico y no es necesario uno con una longitud de 30 cm, por lo que se manifiesta un ahorro en el lecho filtrante.
- En la columna alfa-beta el punto de ruptura para la adsorción de color y turbiedad ocurre al hacer pasar 36 y 41.8 L a través de una columna con 30 cm de altura, pero sugiere que no hubo una saturación del lecho adsorbente.

- Las ondas de adsorción mostraron en el experimento una adsorción relativamente lenta, debido a que conforme se incrementa la concentración del adsorbato disminuyen los espacios libres en el lecho filtrante lo cual es también debido a la adsorción de tipo físico en donde el principal enlace es el de las fuerzas electrostáticas, hasta llegar a una saturación que coincide con el modelo teórico.
- El punto de ruptura al  $T_2$  correspondió al doble del volumen del  $T_1$ , indicando una saturación del lecho adsorbente y una disminución en la capacidad adsorptiva por lo que al alcanzarse el punto  $T_2$  resulta necesario aplicar mantenimiento como lo es el retrolavado.
- No existe un filtro universal, sino filtros adaptados especialmente a cada uno de los problemas que se presentan.
- Para vivir el hombre requiere un promedio de 2 L de agua. Este valor no representa ni el 1 % de la dotación promedio por habitante, el resto se desperdicia. Por ello resulta atractiva la purificación del agua a nivel doméstico.
- El costo de fabricación del carbón activado fue de N\$ 31.70 considerándose que en la extracción y transporte en conjunto consumen el 92 % del total. Al comparar el carbón activado de lirio con otros carbones se encontró que el primero es calidad intermedia y con respecto al carbón Merck y Sigma (N\$ 229.00 y N\$ 264.00 respectivamente) y al carbón Clarimex, cuya calidad es menor, pero su utilidad es con fines industriales y cuyo precio es de N\$ 10.00 por kilo .

## RECOMENDACIONES

- Evaluar diferentes concentraciones de carbón activado de lirio manteniendo la concentración del contaminante constante, determinandose la dosis necesaria para remoción de otros compuestos en adsorción estática.
- Valorar la eficiencia de remoción en el filtrado (adsorción dinámica) para otros compuestos como pueden ser el cloro, metales pesados, coliformes, sustancias tóxicas, entre otros.
- Se recomienda utilizar la antracita por su comportamiento semejante a los sólidos suspendidos en el agua para producir turbiedad.
- Realizar las isotermas de adsorción para otros compuestos de interés sanitario.
- Realizar pruebas de activación con cal común en lugar de hidróxido de calcio para reducir el costo y si es preciso con otros tipos de activantes.
- Utilizar agua desionizada en la fase final del lavado de carbón y en las primeras etapas usar agua corriente.
- Evaluar diferentes longitudes de lecho, pero disminuyendo la concentración de las sustancias disueltas en el afluente a concentraciones más reales.
- Realizar la evaluación del lecho filtrante en la adsorción dinámica de color utilizando para ello ácidos orgánicos como son los ácidos húmicos y fúlvicos, que de cierta manera, son la causa principal de contaminación por color en los cuerpos de agua naturales, dando así otra opción de "potabilización" de agua a zonas rurales.
- Realizar el análisis económico de la factibilidad de fabricar carbón activado así como de realizar estudios de mercado. Buscar y evaluar otras y nuevas formas de

extracción, en el sentido de maquinaria más eficiente y que en su operación sea más costeable, que ayuden de alguna manera a disminuir el costo de disposición del lirio acuático para su aprovechamiento

- Evaluar otros procesos de fabricación del carbon activado. Ej. tambores standard con una capacidad de 200 L como hornos. Este método ha funcionado bien, usando materia prima que se quema rápido, como la palma de coco y la basura de la madera. Se afirma que un hombre puede hacer funcionar un grupo de hasta 10 unidades de tambores y que el proceso requiere un tiempo de carbonización y otro de enfriamiento. Así mismo se compara la eficiencia de la conversión obtenida en estos hornos con los tradicionales y se citan rendimientos hasta del 23 % (sobre la base seca). Uno de los inconvenientes es que los tambores al quemarse se adelgazan en su superficie además que se debe utilizar como combustible el combustoleo y la leña (se puede utilizar el mismo lirio) (FAO, 1983).

#### NOMENCLATURA

|             |                                 |
|-------------|---------------------------------|
| <b>CA:</b>  | <b>Carbón activado</b>          |
| <b>CAP:</b> | <b>Carbón activado en polvo</b> |
| <b>CAG:</b> | <b>Carbón activado granular</b> |

## BIBLIOGRAFIA

- American Public Health Ass.(APHA); et al., 1985. Standard Methods for the examination of the water and wastewater. APHA.,AWWA,WPFC. Washington, U.S.A. 16 th. 1268 P.
- American Water Work Ass. (AWWA), 1971. Water Qualite and Treatment. A Handbook of Public Water Supplies. Mc. Graw-Hill Co. USA. pp. 159-176.
- Barceló Q.D.I., Solís C.H.E. y Flores B.M.H. 1992. Adsorción de compuestos orgánicos sobre caolín desde suspensiones acuosas. Simposio SMISA.
- Barret, S. C. H., 1977. Tristyly in *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. (Water Hyacinth). Biotropica. 9(4): 230-238.
- Barret, S. C. H., 1978a. The evolutionary breakdown of tristyly in *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. (Water Hyacinth) Evolution . 33(1): 499-510.
- Barret, S. C. H., 1978b. Floral biology of *Eichhornia azurea* (Swartz) Kunth (Pontederiaceae). Aquatic Botany. 5: 217-228.
- Barret, S. C. H., 1980a. Sexual Reproduction in *Eichhornia crassipes* (Water Hyacinth) I. Fertilyty of clones from diverse regions. J. Appl. Ecol. 17: 113-124.
- Barret, S. C. H., 1980b. Sexual Reproduction in *Eichhornia crassipes* (Water Hyacinth)II. Seed production in natural populations. J. Appl. Ecol. 17: 113-124.
- Barret, S. C. H., 1985. Floral trimorphism and monomorphism in continental and island populations of *Eichhornia paniculata* (Spreng.) Solms. (Pontedereiaceae). Biol. J. Linn. Soc. 25:41-60.
- Barret, S. C. H., 1989. Waterweed Invasions. Scientific Amer. Oct: 90-97.
- Barrow, M. G. 1968. Química-Física. Reverte, Barcelona, Esapaña, 2a. ed.
- Benitez, G. J. 1985. Elaboración de carbón activado a partir de cascara de coco y otras nueces. Tesis. Ing. Quím. Fac. Química. UNAM., pp 71-73.
- Bock, H. J., 1969. Productivity of the water hyacinths *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. Ecology. 50(3): 460-464.
- Bolaños, F., 1990. El Impacto Biológico. Inst. de Biología. Col. Potsgrado. UNAM, México. No. 7. 476P.
- Bonilla, D.V., Contreras, M.J.R., Carlos, H.G. y J.L.P. Oliva., 1985. Alternativas para el control mecánico para el control de malezas acuáticas. SARH, México. 60 P.
- Broughton, C.W. 1981. Principles of liquid-phase adsortion. En: Eckenfelder, W.W. Application of adsortion to wastewater Treatment. Nasville, Tennessee.
- Brunauer, S. P., H. Emmet y Teller, E. 1938. J. Am. Chem. Soc. 60:309.
- Carlos, H. G., 1989. Aprovechamiento del lirio acuático como mejorador de suelos. En: Control y Aprovechamiento del lirio acuático. Serie de Divulgación. No. 17. CNA. IMTA. SARH. México. pp
- Carrillo, A. A., 1976. Carbones activados a partir de lirio acuático. Tesis Ing. Quim. Fac. Quim. UNAM. 50 P.

- Carrillo, A. A., Chao, O., Cuervo, L y R. Cetina., 1979. Carbones activados a partir de lirio acuático. *Eichhornia crassipes*. Rev. Soc. Quím. Méx. 23(2): 74-75.
- Carrillo, L. J. 1991. Aguas negras redes comerciales, un pueblo que crece y otras consideraciones. *Inf. Cient. Tecno.*, Vol. 13., No. 183, pp. 19-22.
- Castellan, G. W. 1979. *Physical chemistry*. 2a.ed. Adisson Wesley Pub. Co. Inc. Reading, Massachusetts, USA.
- Cetina, R., Chao, O. y L. Cuervo., 1973. Carbones Vegetales activados obtenidos de cachaza. *Rev. Soc. Quím. Méx.* 17(6):237-240.
- Contreras, M. R., 1982a. Reporte técnico de la comisión conferida a la Presa Guadalupe Edo. de Méx. SSA y Subsec. de Mejoramiento del Ambiente. Dir. Gral. de Saneamiento del Agua. Subdir. de Aguas Res. y Receptoras.
- Contreras, M. R. J. y Carlos. G., 1982b. Inventario Nacional de Malezas Acuáticas. SARH. México.
- Contreras, M. R. J., 1983. Control y aprovechamiento de las malezas acuáticas. SARH. México.
- Cordero, L. L. E., 1979. Carbones activados elaborados a partir de hueso de datil. Tesis Ing. Quím. Esc. Cien. Quím. Univ. Aut. de Zac. 82 P.
- Cuevas, G. J. H. y H. L. Corona., 1990. Evaluación de filtros domésticos purificadores de agua. En: VII Congreso de Ing. San. y Amb. SMISAAC. Oax, Oax. A 34-35.
- Chapa, S. H. y J. A. Gaudiano., 1976. El lirio acuático, problemas y soluciones. *El Campo*. México. pp. 3-24.
- Daniels, F. y Alberty, A. R. 1961. *Fisicoquímica*. CECSA. México.
- DEGREMONT., 1971. *Manual Técnico del Agua*. GRAFO. Bilbao, España. 4a ed. pp.244-947.
- De la Compa y S. Gúzman., 1963. El lirio acuático su control y combate. *Boletín de Piscicultura Rural*. S.I.C. XIII. Méx. pp. 78-79.
- De la Loma, O. J. L., 1977. Aspectos Ecológicos del Combate de Plantas Acuáticas. SARH. México.
- DGCOH/DDF. 1990. Estudio del uso del agua en el Distrito Federal. Elaborado por la Compañía Desarrollo y Sistema. Contrato 1-33-1-222, Méx. D.F.
- Diario Oficial de la Federación. 1994. Proyecto de Norma Oficial Mexicana. NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano, límites permisibles de calidad y tratamiento, 15/agosto, pp. 108-112.
- Dubinín . 1966. Porous structure and adsortive properties of active carbon. *Chemistry and physics of carbon*. Vol. 2. Walker Jr. Editor. New York, Marcell, Deccker. Capter 2.
- Eckenfelder, W. W. 1981. *Application of adsortion to wastewater treatment*. Nasville, Tennese, USA.
- El Bronco., 1991. Proceso de recolecta ecológica integral de lagos naturales y artificiales invadidos por lirio acuático. Informe Técnico. El Bronco. Tecnología Universal. Culiacan, Sin. 17 P.

Erdos A.C. 1960. J. Rev. Soc. Quím IV (4).

Escamilla, G. I., 1988. Análisis bromatológicos y propiedades nutricionales del lirio. En: Memorias del Seminario-Taller Control y Aprovechamiento del lirio acuático. 18-20 ENE. Cuernavaca, Mor. IMTA. Subcoordinación de calidad del agua. SARH. 473 P.

Esquinca, C. F. et al., 1988. Experiencias del control y aprovechamiento del lirio acuático en los canales de Xochimilco, D. F. En: Memorias del Seminario-Taller Control y Aprovechamiento del lirio acuático. 18-20 ENE. Cuernavaca, Mor. IMTA. Subcoordinación de Calidad del Agua. SARH. 473 P.

Escobar, C. E., 1977. Manual para el control químico de las malezas acuáticas. SARH. Méx. 86P.

Eskell, N., 1979. Tratamiento de aguas para la industria y otros usos. CECSA. 258 P.

FAO . 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. pp 77-79.

Gallina, A. J., 1984. Remoción de impurezas de las aguas residuales mediante el uso de carbón activado. Informe Técnico SARH. 16 P.

Gopal, B. 1987. Water hyacinth. Aquatic plants. Studies 1, Elsevier . Netherlands 471

Guerasimov, Y. 1977. Curso de Química-Física. Tomo I. Mir Moscow. URSS. pp. 442-547.

Gutiérrez, G. D. 1990. Diseño de una curva de filtración de agua con carbón activado. Tesis Ing. Quím. Fac. Quím. UNAM. 77 P.

Gutiérrez, L. E., 1991. Diagnóstico del control de lirio acuático en México, Acciones Futuras. IMTA. Inf. Téc. 34 P.

Gutiérrez, L. E., Uribe, G. E. y E.F. Ruiz (1994) Control del lirio acuático. Serie Control de Malezas Acuáticas. Manual 1. CNA, México. (En prensa).

Glastone, S. 1972. Tratado de química-física. Aguilar. Madrid, España, 1075-1098.

Hassler, J. W. 1951. Active Carbon, Chemical Pub. Co. Brooklyn. NY. USA.

Holm, G. L., L. D. Plunknett, V. J. Pancho & P.G. Herbenger., 1977. *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. (Pontederiaceae, Pickerel-weed family) In: The world's worts weeds distribution and biology publication for the East-Weast by the University Press. of Hawaii. USA. pp. 72-77.

Hutchinson, G. E., 1975. A treatise on Limnology. Limnological Botany. Vol. III. Willey-Interscience Pub. New York. USA. 660 P.

Instituto Nacional del Consumidor (INCO). 1992. Calidad de filtros desinfectantes de agua y aguas envasadas. Rev. Cosumidor. No. 183, México.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)- Diseños Hidráulicos y Tecnología Ambiental, S.A.(DHTA). 1994. Programa de control de malezas acuáticas en el lago de Chapala, Jal. Contrato IMTA-93/755. Jiutepec, Mor. México.

Jiménez, C.T.F. 1988. Preparación de carbón activado a partir de desecho de café percolado. Tesis Químico. Fac. Química. UNAM. México. 20-24.

- Kirk, R.E. y Donald F.O. 1961. Enciclopedia de Tecnología Química. V.I Adsorción. UTEHA. México.
- Lallana, H. V. y M. C. Marta., 1980. Biología floral de *Eichhornia crassipes* (Mart.)Solms. en el Parana Medio. Rev. Asoc. Nat. Litoral. 11: 73-81.
- Lallana, H. V., 1981. Biología floral de *Eichhornia azurea*. (Swartz) Kunth (Pontederiaceae). Rev. Asoc. Cien. Nat. Litoral. No. 12. pp.128-135.
- Lallana, H. V., 1987. Evaluación de la fructificación de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach ("Camalote"). Bol. Asoc. Cien. Nat. Lit. 7(1): 5-10.
- Leet, y Judson., 1980. Fundamentos de Geología Física. Limusa. México.
- Leyva, R. R., Mendoza, B. J., García, T. S. A., 1990. Eliminación de nitratos de solución acuosa por medio de carbón activado. Memorias del VII Congreso Nacional SMISAAC. Ingeniería Ambiental y Salud. C 59-63.
- López, C. S., 1986. Estudio de adsorbentes no convencionales. Tesis Ing. Bioquim. ENCB. IPN. México. 66 P.
- Martell, L.C. 1947. Industrial carbon. Van Mostrand Co. NY. USA., pp. 141-147.
- Martínez, A. P. 1988. Uso de las cosechadoras mecánicas Aquamarine pra el control de las malezas acuáticas . Reporte Técnico.
- Mattson, J. S. y Mark, H. B. 1971. Actived carbon. Marcell Dekker Inc. New York. USA. 273 P.
- Mc Guire, J. M. et al., 1991. Evaluating GAC for trialomethane control. J.A.W.W.A. 83(1): 38-48.
- Monroy, H. O., 1988. Consideraciones teóricas para la obtención de biogas a partir del lirio acuático. En: Control y Aprovechamiento del lirio acuático. CNA. IMTA. SARH. Serie de divulgación. No. 17. pp .
- Monsalvo, T. J., 1988. Expeiencias del control mecánico del lirio en la presa Valsequillo, Pue. En: Memorias del Seminario-Taller Control y Aprovechamiento del lirio acuático. 18-20 ENE. Cuernavaca, Mor. IMTA. Subcoordinacion de calidad del agua. SARH. 473 P.
- Niño, S. M. y A. Lot., 1983. Estudio demográfico del lirio acuático. *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. Bol. Soc. Bot. Méx. 45:71-83.
- Niño, S. M., 1984. Antecedentes del aprovechamiento del lirio acuático. En: Memorias del Seminario-Taller Control y Aprovechamiento del lirio acuático. 18-20 ENE. Cuernavaca, Mor.IMTA. Subcoordinacion de calidad del agua. SARH. 473 P.
- Olvera V.V. 1989. Biología y ecología del lirio acuático *Eichhornia crassipes* (Mart) Solms. En Control y aprovechamiento del lirio acuático en México. IMTA. Serie Divulgación 17.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 1983. Método simple para fabricarcarbón vegetal. FAO. Roma, 154 P.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). 1985. Guías para la calidad del agua potable. Pub. Cient. OPS. OMS. Washington, USA. 136 185 P.
- Penfound, W. T. y T. T. Earle., 1948. The biology of the water hyacinth. Ecol. Mon. 18: 447-472.

Petrokva, S.V., Flores, O. L. M., Gómez N. A., González D.L., Bahena, R. J. y Vazquez V. S. 1994. Remoción de color. IMTA. Informe Final. 58 P.

Pieterse, A. H. 1978. The Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*); a review", Abstr. Trop. Agric., Amsterdam, Vol. 4, núm.2, pág. 9-42.

Quiroz, F.A. y Miranda A.M.G. 1992. Agua residuales y plantas vasculares acuáticas. Ciencias. No. 25. pp. 45-46.

Rico, M. M., Sánchez, M. A. C. y A. M. Figueroa., 1989. Estudios del uso del lirio acuático para la purificación de agua residual, En: Control y Aprovechamiento del lirio acuático. CNA. IMTA. SARH. Serie de divulgación. No. 17. pp 133-146.

Rosales, C. M. F. et al., 1991. Evaluación de filtros de uso doméstico. Informe Técnico. IMTA. CNA. 37 P.

Sandoval, V. A. M. y L. O. Castellanos., 1990. Aplicación de los filtros de cantera café como dispositivo de potabilización de zonas rurales. Memorias del VII Congreso Nacional SMISAAC. Ingeniería Ambiental y Salud. A 23-27.

Sánchez, S. O. 1980. La flora del Valle de México. Herrero. México. 519 P.

Sarmiento, S. A., 1985. El tezontle como adsorbente no convencional. Tesis Ing. Bioquim. ENCB. IPN. México. 168 P.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE)., 1991. Filtros SEDUE. Instructivo de uso.

Sculthorpe, D. R., 1985. The biology of aquatic vascular plants. St. Martin Press. New York, USA. 911 P.

Sokoloff, V.P. y J. L. Lorenzo., 1953. Modern and alicient soils at some archaeological sites in Valley of Mexico. Amer. Antiquity. 211(1): 90-98.

SORE." RETADOR". SORE. Comp. Constructora. Hgo. S.A. 1992 Especificaciones Instructivo. Tepeji del Río, Hgo. 7 P.

Tapia, V. G. J. 1978. Estudio relativo ala adsorción con carbón activado para eliminar contaminantes en aguas residuales. Tesis Ing. Quím. Fac. Química. UNAM., Méx. pp 12-16.

Treybal, E.R.,1980. Operaciones de transferencia de masas. Mc.GRAW-HILL. 455 P.

Valdez, O. O. H., 1981. Carbon Activado, Usos y Aplicaciones en Sistemas Líquidos. Tesis Ing. Quím. Fac. Quím. UNAM, México. 99 P.

Western Water International. s/f. Aquaspace Water Filters. Marlboro, MD. USA.