

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA  
INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA BERZELIUS

# Uso de Cambiadores Iónicos en Análisis Químico de Aguas Potables y Minerales

TESIS PROFESIONAL QUE  
PARA OBTENER EL TITULO  
DE QUIMICO PRESENTA:

MAXIMILIANO GARCIA VIGIL

---

1 9 6 1

MEXICO, D. F.



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.

**USO DE CAMBIADORES IONICOS EN ANALISIS QUIMICO  
DE AGUAS POTABLES Y MINERALES**

*A MIS PADRES:*

*MAXIMILIANO GARCIA ORDIALES y  
MARIA PAZ V. DE GARCIA,  
CON CARINO Y AGRADECIMIENTO.*

*A MIS QUERIDOS HERMANOS*

*A TI, PEQUEÑA, PORQUE ESTE SEA EL  
PRIMER PELDAÑO EN NUESTRA  
FELICIDAD.*

*AL SR. DR. LUIS VERA*  
*CON TODO AGRADECIMIENTO.*

*A MI QUERIDO MAESTRO:*

*RAFAEL MOLINA BERBEYER.*

*A MIS MAESTROS*

*AL SR. Q. LUIS Y. VILLEGAS,*

*POR SU GRAN AYUDA.*

## *USO DE CAMBIADORES IONICOS EN ANALISIS QUIMICO DE AGUAS POTABLES Y MINERALES*

### **I).—GENERALIDADES DE LOS CAMBIADORES DE IONES:**

- 1.—Historia de los cambiadores de iones.
- 2.—Características físico-químicas de los cambiadores de iones.
- 3.—Cambiadores iónicos, catiónicos y aniónicos.

### **II).—TRABAJO EXPERIMENTAL:**

- 1.—Aplicación de los cambiadores iónicos en los métodos analíticos de aguas:
  - a) Preparación de cartuchos con cambiadores iónicos.
  - b) Técnica de muestreo de agua en el campo.
  - c) Extracción de los iones y regeneración de los cartuchos.
- 2.—Técnica analítica.
- 3.—Estudio de la adsorción de iones borato y metales pesados.
- 4.—Interpretación de resultados.

### **III).—APLICACIONES.**

### **IV).—CONCLUSIONES.**

### **BIBLIOGRAFIA.**

*CAPITULO I*

**GENERALIDADES DE LOS CAMBIADORES DE IONES**



## 1.—HISTORIA DE LOS CAMBIADORES DE IONES.

El tratamiento de aguas por adsorbentes sólidos tales como la arena, es probablemente tan viejo como la civilización misma. Se tienen antecedentes del tiempo de Aristóteles que indican el uso de filtros de arena para la purificación de agua de mar y aguas potables impuras. La apreciación de las relaciones inherentes a este fenómeno, se fueron encontrando gradualmente hasta nuestros días, en que se ha estudiado su posible utilización para potabilizar el agua de mar.

Una posible interpretación moderna del milagro de Moisés en su larga travesía con los Israelitas a través del desierto, sugiere la aplicación de cambiadores de iones. Para lograr mejorar las aguas del Marah durante la Jornada, Moisés encontró un árbol que al sumergirlo en las aguas, hacía que éstas se ablandaran. Se supone, que las oxidazas de la celulosa del árbol daban una reacción de intercambio con los electrólitos del agua haciéndolas potables.

En 1623 en "The New Atlantis", Sir Francis Bacon describe ciertos estanques imaginarios: "Y nosotros teníamos estanques en los cuales, las sales se convertían en agua fresca, y otros en que las aguas frescas se cambiaban en sales".

En "Sylva Sylbarum", Bacon describe: "...el agua salada se pasaba a través de arena contenida en diez recipientes, por uno después de otro, y aún no perdían toda su salinidad, pero cuando se pasaban por veinte recipientes, el agua tornábase fresca".

Aparentemente Bacon había encontrado la operación de deionización siglos antes de que la operación se materializara. Es tiempo después, que Hales, describe experiencias en que indica que el agua de mar queda libre de sales al pasarla a través de cisternas de piedra. La habilidad de las arcillas y arenas de adsorber compuestos solubles en licores, fue extensamente estudiada por Sir Humphry Davy, Lambuschini, Huxtable y otros en la primera parte del siglo XIX. Gazzari en 1819 observa la decoloración de licores al pasarlos por arcillas y la adsorción gradual de sustancias solubles realizadas por arenas. Liebig y Thompson encontraron la capacidad de las arcillas para adsorber amoníaco.

Fuchs en 1833, reporta que algunas arcillas desprendían sodio y potasio al ser tratadas con cal. Sin embargo el crédito del reconocimiento del fenómeno del intercambio iónico es generalmente atribuido a Thompson y Waydo, Químico-agricultores ingleses. En 1848, H. S. Thompson escribe a Tho-

mas Way que en el tratamiento de sulfato de amonio y carbonato de amonio con arenas la mayor parte del amonio se adsorbe desprendiendo el carbonato y el sulfúrico. En los años de 1850 a 1854 Way reporta los resultados de su extenso estudio de este fenómeno a la "Real Sociedad de Agricultura" de Londres con las siguientes conclusiones:

- 1).—El cambio de iones de calcio y amonio en arenas de que hablaba Thompson ha sido verificado.
- 2).—El cambio de iones en arenas es un intercambio de cantidades equivalentes.
- 3).—Ciertos iones se cambian más fácilmente que otros.
- 4).—Dado un valor tope la extensión del cambio se aumenta con la concentración.
- 5).—El coeficiente de temperatura en el intercambio fue menor que el de una reacción química verdadera.
- 6).—Los silicatos de aluminio presentes son los responsables del intercambio.
- 7).—Un tratamiento térmico, destruye las propiedades cambiadoras de los silicatos.
- 8).—Materiales cambiadores, pueden sintetizarse a partir de silicatos solubles y aluminio.
- 9).—El cambio de iones difiere de la adsorción física.

El trabajo de Way es el primer estudio sistemático del cambio de iones y no hubo más trabajos sobre esta reacción por décadas.

Reconocido el crédito a Way y Thompson en la reacción de intercambio iónico, es interesante hacer notar que Graham, padre de la química coloidal, reporta dos décadas antes, que el carbón adsorbe la plata del nitrato de plata y Espirit encuentra que una sal neutra en contacto con carbón, libera ácido cuando el catión de la sal se adsorbe.

El intercambio iónico al encontrarse en contacto un electrolito soluble con algún sólido ionizable, es evidente en el trabajo de Way: sus experiencias sirven de estímulo a muchos científicos de su época. El trabajo de Way fue continuado por Boedeker, Peters, Wolff, Frank, Sestini y Eichorn. En 1876 Lemberg encuentra la posibilidad de transformar el mineral leucita ( $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ ) en analcita ( $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) por el tratamiento del mineral con una solución de cloruro de sodio, esta transformación puede hacerse reversible por el tratamiento de analcita con una solución de cloruro de potasio. Este experimento de Lemberg es el punto clave porque ilustra claramente la estequiometría y reversibilidad de los procesos de intercambio iónico.

Así el trabajo de Lemberg estimula a químicos y geoquímicos, pero no fue sino hasta el principio del siglo XX, que el intercambio iónico fue usado para

el ablandamiento de agua. Los estudios clásicos de cambio iónico de Gans son probablemente el primer paso para la utilización de los cambiadores en procesos industriales. Gans emplea silicatos de aluminio sintéticos y naturales en el ablandamiento de agua y también para el tratamiento de soluciones azucaradas. El cambio de siglo provoca una avalancha de contribuciones al fenómeno del cambio iónico en silicato, arcillas y tierras.

Es con el desarrollo de las resinas sintéticas orgánicas que se amplía en gran forma la aplicación de los procesos a base de cambiadores de iones. Esto fue provocado principalmente por dos factores: la mayor estabilidad química de las resinas y la mayor capacidad de los cambiadores catiónicos, con grandes mejoras en los cambiadores aniónicos fuertes.

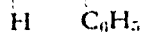
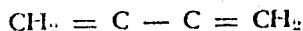
Actualmente estas resinas mejoradas y la avanzada tecnología del proceso de los cambiadores, ha obtenido la aceptación del proceso como una operación química unitaria.

## 2.—CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS CAMBIADORES DE IONES.

El intercambio iónico puede ser definido: como un intercambio de iones que se efectúa entre un sólido y un líquido, en el cual, no hay cambio sustancial en la estructura del sólido. En esta definición el sólido es el material cambiador o la partícula resinosa. Una partícula resinosa, puede imaginarse como un hidrocarburo tridimensional elástico al que se unen varios grupos ionizables. En el intercambio, la naturaleza química del hidrocarburo se ve afectada en cierto grado, pero sin cambiar su calidad. El hidrocarburo ideal es el formado por la copolimerización del estireno y el divinilbenceno.



*Estireno*



*Divinilbenceno*

Esta estructura da la máxima resistencia a la oxidación, reducción, abrasión mecánica y es insoluble en solventes comunes. Se les da después forma de esferas o de gotas de excelentes propiedades hidráulicas.

La naturaleza del grupo ionizable unido al hidrocarburo, determina el comportamiento químico de una resina cambiadora. Al presente hay cuatro tipos de resinas comerciales, conocidas como: resinas catiónicas fuerte y débilmente ácidas y resinas aniónicas: fuerte y débilmente básicas.

La capacidad de un cambiador es el número de iones, o iones potenciales, dados por unidad de peso o volumen de resina. La capacidad total en peso seco es generalmente expresada en miliequivalentes por gramo de resina

seca deshidratada. La capacidad total en volumen húmedo, está dado por unidad de volumen de resina hinchada. El desempeño de un cambiador de iones, se basa generalmente en el volumen seco y la capacidad total de volumen húmedo, es la capacidad teórica o máxima, la cual puede mostrar la resina en cualquier aplicación acuosa de intercambio. Se puede expresar en términos de miliequivalentes por mililitro, libras de un ión en particular por pie cúbico, etc., o lo usual en el tratamiento de aguas, kilos-carbonato de calcio por metro cúbico. El número neto, utilizado en un volumen dado de resina, en un ciclo dado, se conoce como "capacidad de operación" de la resina, en ese ciclo particular y puede expresarse en los mismos términos que la capacidad total o bien, como un porcentaje de la capacidad total.

La equivalencia de intercambio ha sido bien establecida; muchos equivalentes iónicos, salen de la columna de cambiadores como entran en ella, es por tanto, la serie de hechos que pueden ocurrir en una columna cambiadora para hacerla parecer de otro modo. El caso más simple es el de la neutralización básica o ácida en la cual el afluyente contiene agua solamente. Pueden también formarse precipitados que son filtrados fuera de la resina. Asimismo, muchos materiales son físicamente adsorbidos u ocluidos en la resina, al menos temporalmente (v. gr. ácidos orgánicos y aminas). Por tanto, balances de materia, son fácilmente usados en bases equivalentes, para obtenerlos en un proceso de cambio de iones.

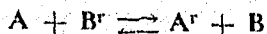
Una resina catiónica, fuertemente ácida, es comparable en poder ácido con el ácido clorhídrico y puede formar ligaduras electrónicamente estables con cualquier catión. De la misma forma las resinas aniónicas fuertes son comparables con el hidróxido de sodio, formando ligaduras tan estables como puede formarlas cualquier anión. Sin embargo también existen iones que no se ligan efectivamente a las resinas cambiadoras; estos iones, son de tipo complejo o bien iones orgánicos, que por su tamaño o configuración, son de difícil entrada o de difícil adsorción en el interior de las partículas de resina. Esto no significa, que las ligaduras entre las resinas cambiadoras de iones, tienen afinidad preferente, por tipos particulares de iones, a los que captan o adsorben, si tienen oportunidad. Esta preferencia, se conoce como Selectividad de la Resina.

La constante de equilibrio fisico-química, no es estrictamente aplicable a sistemas de resina cambiadora; pues es necesario substituir el coeficiente de selectividad. Por ejemplo, para una resina que contiene el ión B, en una solución de ión A, permitiendo el equilibrio, el coeficiente de selectividad

A  
(Kc) está definido como:  
B

$$(Kc) = \frac{A \text{ (conc. de ión B. en sol.)} \times \text{(conc. de ión A en resina)}}{B \text{ (conc. de ión B en la resina)} \times \text{(conc. de ión A en solución).}$$

o, algebraicamente para la reacción:



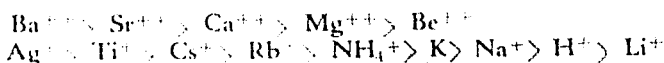
$$(K_c) = \frac{A \quad (A^r) (B)}{B \quad (A) (B^r)}$$

Sin embargo, esta definición no toma en cuenta los coeficientes de actividad de los dos iones en las dos fases. Actualmente, aún no hay un método satisfactorio para determinar los coeficientes de actividad de los iones en la fase resina y por tanto se omite. El coeficiente de actividad de iones en solución, se puede obtener de literatura y se puede agregar a la expresión anterior para comprobación de resultados, cuando se trabaja con soluciones a distinta dilución. Por tanto, la ecuación anterior es aplicable solamente en la técnica de los cambiadores.

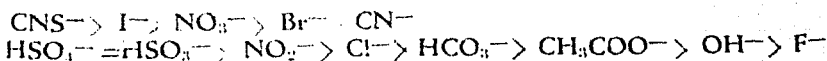
De mayor importancia, tanto teórica, como práctica, para la química e ingeniería de los cambiadores de iones son los siguientes factores que influyen en el coeficiente de selectividad:

a) Tipo de grupo funcional: La pregunta inicial será si la resina es un cambiador aniónico o catiónico. El efecto de los grupos funcionales sobre la selectividad de la resina, es importante para el poder ácido o básico.

b) Valencia y naturaleza del intercambio iónico: En general se puede decir, que a concentraciones menores que la décimo normal, los iones divalentes encajaron mejor en la resina que los monovalentes, y, a su vez los trivalentes mejor que los divalentes. Cuando los iones intercambiados son de la misma valencia, la resina tiene preferencia. Las dos series siguientes podrían servir de ejemplo en la selectividad decreciente de una resina ácida:



en forma similar para una resina básica fuerte:



Debe recordarse que cuando existe equilibrio entre varias formas de material ionizado, por ejemplo los ácidos crómicos, todos los iones de la misma carga compiten por las posiciones en el cambiador. Este factor, se usa para el estudio de las formas iónicas y los complejos existentes en ciertas soluciones.

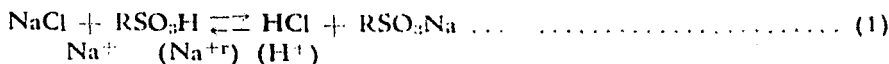
c) Naturaleza de los iones no cambiables: La naturaleza de los iones no cambiables, tiene poco efecto en la selectividad, pues tienden a formar complejos o moléculas ligeramente ionizables con iones cambiables. El mejor ejemplo de este caso, lo dan ciertos iones metálicos el más común es el ión férrico en soluciones cloradas concentradas. En este caso, hay una tendencia a formar aniones complejos de la forma  $FeCl_4^-$ , que son fuertemente fijados por las resinas de amonio cuaternarias. Así trazas de hierro, pueden

ser removidas de soluciones concentradas de ácido clorhídrico pasándolas a través de columnas con cambiadores básicos fuertes en forma de cloruros. El hierro puede removerse de la resina con agua, o ácido diluido hasta extraer el complejo, siempre y cuando, no exista una alta concentración de cloruros.

d) Forma iónica de las resinas: La selectividad de la resina, para el cambio de un ión en particular, va decreciendo a medida que la resina pasa a la forma iónica. En la mayoría de los casos, este efecto es ligero, pero hay que tener en cuenta que el coeficiente de selectividad trabaja solamente para una forma iónica específica de la resina. La forma iónica se expresa generalmente como la fracción mol de la resina la cual es de la A, y en el equilibrio se designa como  $X_A$ . En general el mayor valor de  $(Xc)_B$  será mayor si se cambia con  $X_A$ .

e) Fuerza iónica total en la solución: Cambios univalentes son poco afectados por cambios en la fuerza iónica total de la solución. Esto da una consideración importante en cambios entre iones de diferente valencia, así como en los cambios mono-divalentes.

Por ejemplo para la reacción:



$$(Kc) = \frac{\dots \dots \dots}{\text{H}^+ (\text{Na}^+) (\text{H}^{+r})} \dots \dots \dots (2)$$

Sustituyendo los valores

$$X_{\text{Na}^+}^r : \text{Fracción equivalente de Na en la resina} :: (\text{Na}^{+r}) / C^r$$

$$X_{\text{Na}^+} : \text{Fracción equivalente de Na en solución} :: (\text{Na}^+) / C$$

en la cual:

C: Normalidad total de la resina.

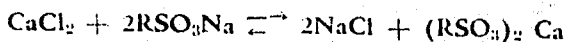
C<sup>r</sup>: Normalidad total de la solución.

la ecuación (2) toma la forma:

$$\frac{X_{\text{Na}^+}^r}{1 - X_{\text{Na}^+}^r} = (Kc) \frac{\text{Na}^+}{\text{H}^+} \frac{X_{\text{Na}^+}}{1 - X_{\text{Na}^+}} \dots \dots \dots (3)$$

esta expresión, de la fracción equivalente de Na en la resina, en función de la solución con la cual la resina está en equilibrio. Hay que tomar en cuenta que los términos  $C^r$  y  $C$ , no aparecen en esta ecuación.

Para la reacción:



$$(\text{Kc}) \frac{\text{Ca}^{++}}{\text{Na}^+} = \frac{(\text{Ca}^{++}) (\text{Na}^+)^2}{(\text{Ca}^{++}) (\text{Na}^+)^2}$$

cuando esta última ecuación, se expresa en términos, de una fracción equivalente de Ca en la solución de resina, tenemos:

$$\frac{X}{(1 - X^r)^2} = (\text{Kc}) \frac{\text{Ca}^{++}}{\text{Na}^+} \cdot \frac{C^r}{C} \cdot \frac{X}{(1 - X)^2} \frac{\text{Ca}^{++}}{\text{Ca}^{++}}$$

en esta ecuación, el coeficiente de selectividad aparente, es el término:

$$(\text{Kc}) = \left( \frac{C^r}{C} \right)^2$$

en que  $C_r$  es la capacidad de la resina por unidad de volumen, y por tanto, es fijada por cada resina en particular. La selectividad de la resina para el ión divalente, es en el cambio, inversamente proporcional a la concentración total de la solución. La mayor dilución de la solución y la mayor selectividad de la resina, es conveniente para los iones divalentes. Como  $C_r$  es la normalidad de la fase resina, depende del volumen de abultamiento que a su vez es función de la ligadura.

Los coeficientes de selectividad aparentes tienen esta misma forma para cambios entre iones divalentes y trivalentes. En el caso de intercambio entre iones monovalentes y trivalentes, la expresión toma la forma:

$$(\text{Kc}) = \left( \frac{C^r}{C} \right)^3$$

esto significa, que la selectividad de la resina para el ión trivalente es inversamente proporcional al cuadrado de la concentración total de la solución.

Este efecto de ión polivalente, es el que hace posible el ciclo de ablandamiento de agua que se obtiene con cambiadores de iones. Los iones divalentes de Ca y Mg, son tomados del agua dura (en solución muy diluida) y después son fácilmente desplazados de la resina por los iones de Na de una solución relativamente concentrada en sales.

### 3.—CAMBIADORES CATIONICOS Y ANIONICOS:

Para una mejor selección de resina, es necesario tomar en cuenta varios factores, en este caso particular, los principales son: el tamaño de partícula, y el tipo de ligadura en la resina.

Tamaño de partículas; en los cambiadores de iones, las partículas están formadas por pequeñas gotas de resina, cuyo diámetro varía desde 1 mm. hasta 0.4 mm. Partículas de mayor tamaño, tienden a romperse o maltratarse en los procesos de manufactura. El tamaño en partículas de las resinas, está dado por un estandar de medidas americano.

Se da el tamaño de medida húmedo (en mallas), basado en la medida del producto final. El tamaño especial, está dado por la medida del copolímero en gotas después que el grupo funcional fue introducido. El tamaño final, después del hinchado por agua, de la resina; depende del tipo de grupo funcional introducido, y la cantidad de ligaduras en el copolímero. Este tamaño final puede obtenerse mediante un factor. (Fig. 1).

A medida que disminuye el tiempo requerido por la resina para llegar al equilibrio, con la solución puesta en contacto con ella, se puede dar una proporción de control en la mayoría de las reacciones con cambiadores, este sería: "la difusión entre las partículas de resina, es inversamente proporcional al cubo del diámetro de la partícula". Si se disminuye, el tiempo requerido para el equilibrio, la eficiencia para un volumen dado de resina aumenta, o sea, el volumen requerido para una operación específica es menor. La posibilidad de la aplicación práctica depende de cada reacción de intercambio en particular.

Asimismo los aspectos físicos de una operación, se alteran cuando se cambia el tamaño de la resina. Así, el tamaño de la partícula de la resina se hace menor, y las pérdidas por fricción y caídas de presión del líquido que fluye a través de la columna aumentan. Para una caída de presión dada, al disminuir el tamaño de partícula, disminuye el gasto de la columna (Fig. 2).

*Resina Catiónica* fuertemente ácida. Está hecha por la sulfonación nuclear de gotas de estireno-divinilbenceno. Las resinas de ácido sulfónico son el único tipo de resinas catiónicas de uso comercial. Como es fuertemente ácida, permanece altamente ionizada en forma de sales, o en forma ácida.

La conversión de una sal neutra, a su ácido correspondiente, tiene la siguiente reacción:





Figura 1

Factores de Hinchamiento  
de La Resina

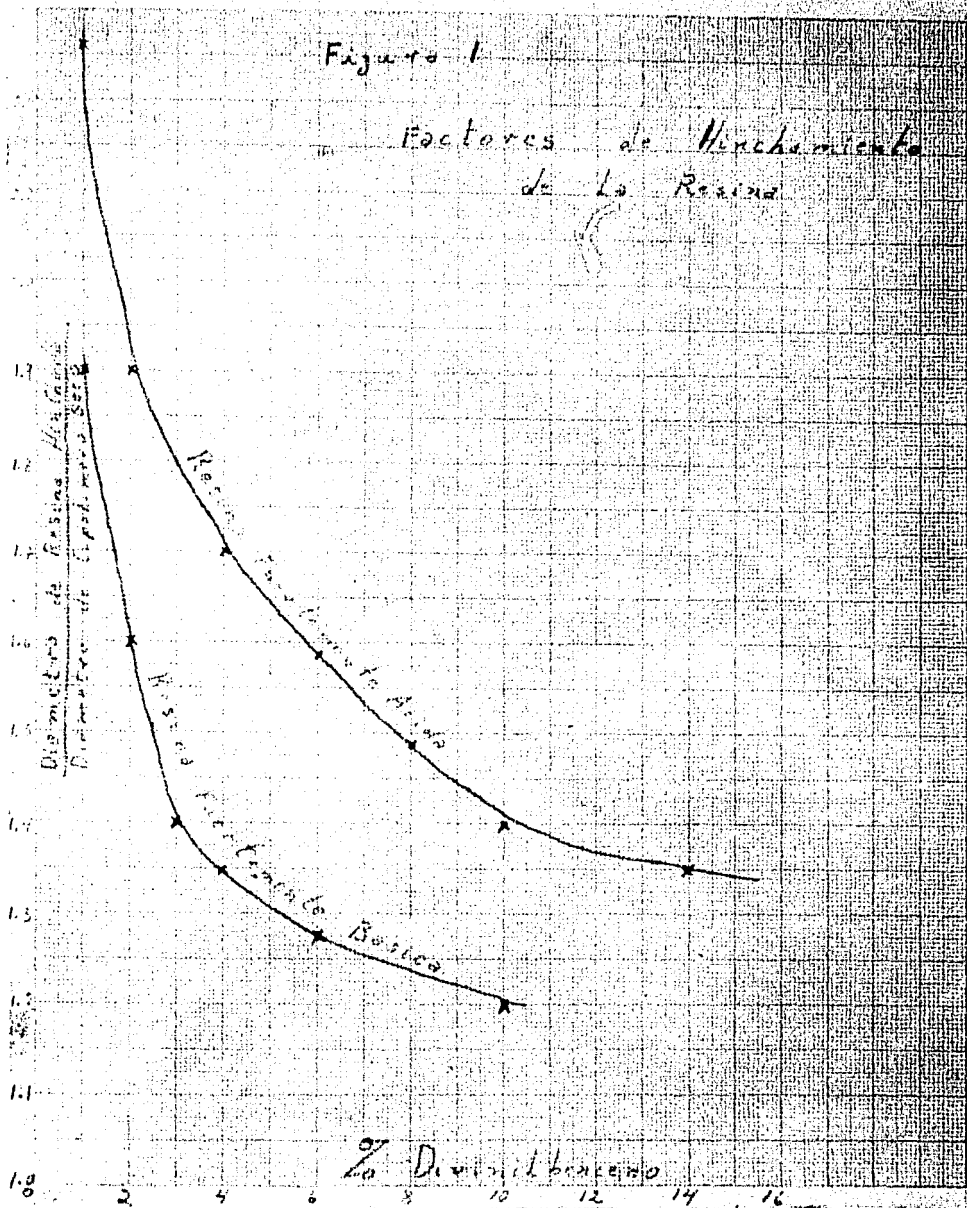
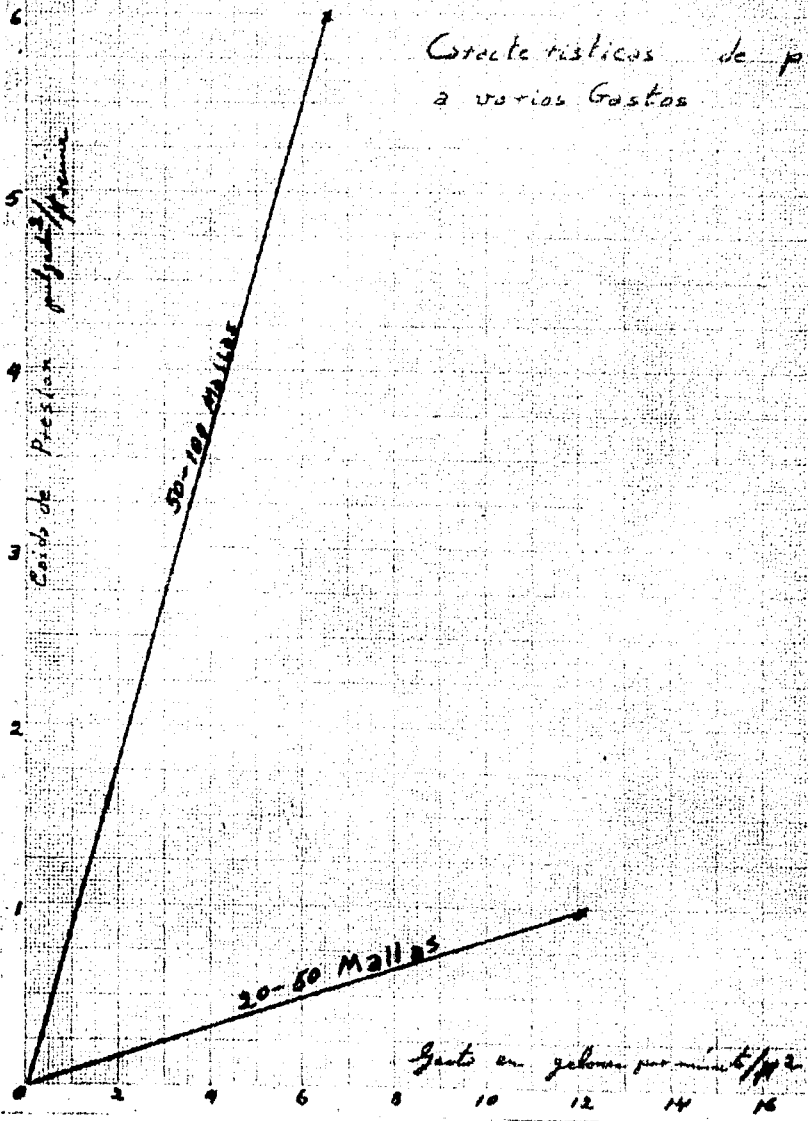


Figura 2

(14)

Características de presión  
a varios Gastos



esta reacción, es llamada de "rajado de la sal", y es el primer paso en la des-mineralización por intercambio iónico.

Este tipo de resina, es muy usado en unidades domésticas e industriales de ablandamiento de agua. En su aplicación, exhibe un alto grado de selectividad por cationes duros del tipo del calcio y el magnesio, cambiándolos por sodio en la producción de agua blanda.

La demineralización, o deionización completa, se consigna en el ciclo de hidrógeno, usada junto con un cambiador aniónico.

La versatilidad de las resinas catiónicas es grande, pues pueden emplearse en cromatografía, recuperación de metales, deionización de glicerina, descontaminación de material radioactivo, purificación de productos intermedios en reacciones químicas, y como catalizador.

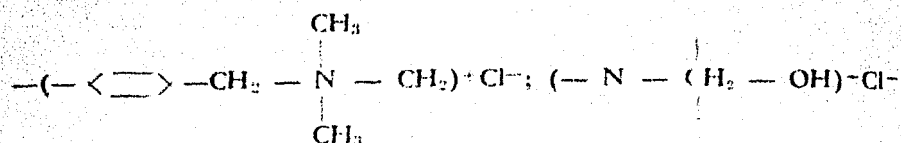
A continuación, se dan las características de esta resina:

Tipo .....	Cambiador catiónico fuertemente ácido.
Grupo activo .....	Acido sulfónico nuclear
Ligadura estandar (% divinilbenceno) .....	8%
Forma iónica de cambio .....	Na <sup>+</sup> ;o, H <sup>+</sup>
Forma física .....	esferas
Tamaño estandar (húmedo) .....	20-50 mallas.
Tamaño especial (seco) .....	50-100; 100-200; 200-400.
Densidad lbs f. <sup>3</sup> .....	forma Na, 53; forma H, 50.
% cambio de volumen .....	Na <sup>+</sup> → H <sup>+</sup> = 8%.
Rango de pH efectivo .....	0-14
Selectividad .....	Na <sup>+</sup> H <sup>+</sup> = 1.2
Orden de selectividad de iones .....	Ag > Cs > Rb > K > NH <sub>4</sub> > Na > H > Li > Ba > Sr > Ca > Mg > Be

*Capacidad total de cambio:*

Ce → CaCO <sub>3</sub> en Kg ft <sup>-3</sup> ..	forma Na—41.5; forma H—37
Me <sub>3</sub> g resina seca .....	forma Na— 4.8; forma H— 5
Meq ml resina húmeda ...	forma Na— 1.9; forma H— 1.7
Esfericidad en % .....	> 85
Expansión de la cama ...	30% máximo; 4 gpm ft <sup>2</sup> a 25°C.
Abatimiento de presión ...	aproximadamente a 0.5 lbs in <sup>2</sup> ft a 5 gpm/ft <sup>2</sup>

**Resina aniónica fuertemente básica.** Está formada por una resina base de amina cuaternaria; los cuatro sustituyentes en un átomo de nitrógeno, son tres grupos metílicos, y un grupo bencílico polimerizado:



Existe otro tipo de resinas, en la que uno de los grupos metílicos está reemplazado por un grupo alcohólico tipo etanol.

Estas resinas difieren principalmente en su relativa afinidad por los iones cloruro y los iones hidroxilo, así como también en la estabilidad química. Las primeras son más difícilmente convertibles a la forma hidróxida, sin embargo son más estables químicamente, en especial en forma hidróxida.

Las resinas aniónicas de aminas cuaternarias están altamente ionizadas, y pueden ser usadas en cualquier rango de pH. Dan también la reacción de "rajado de sal", que convierten una sal neutra a su base correspondiente.



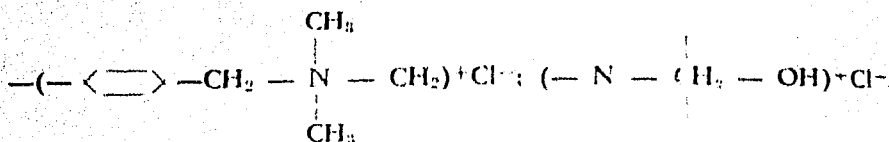
como se ve el cambio de catión, por una base fuerte, puede remover todos los compuestos iónicos.

Entre sus varias aplicaciones, se tiene la desalcalinización; extracción del uranio que recubre las vetas de ciertos minerales; remoción del azufre y mercaptanos de los hidrocarburos; cromado; catalisis y varias más.

Las características de esta resina, son:

Tipo .....	cambiador aniónico fuertemente básico.
Grupo activo .....	dimetil etanol-benzil amonio.
Ligadura estandar (% divinilbenceno) .....	8%
Forma iónica de cambio .....	Cl <sup>-</sup>
Forma física .....	esférica
Tamaño estandar (húmedo) .....	20-50.
Tamaño especial (seco) .....	50-100; 100-200; 200-400.
Densidad lbs ft <sup>3</sup> .....	44
% cambio de volumen .....	Cl <sup>-</sup> → OH <sup>-</sup> = 14%
Rango de pH efectivo .....	0-14
Selectividad .....	Cl <sup>-</sup> OH <sup>-</sup> = aprox. 1.5.

**Resina aniónica fuertemente básica.** Está formada por una resina base de amina cuaternaria; los cuatro sustituyentes en un átomo de nitrógeno, son tres grupos metílicos, y un grupo bencílico polimerizado;



Existe otro tipo de resinas, en la que uno de los grupos metílicos está reemplazado por un grupo alcohólico tipo etanol.

Estas resinas difieren principalmente en su relativa afinidad por los iones cloruro y los iones hidroxilo, así como también en la estabilidad química. Las primeras son más difícilmente convertibles a la forma hidróxida, sin embargo son más estables químicamente, en especial en forma hidróxida.

Las resinas aniónicas de aminas cuaternarias están altamente ionizadas, y pueden ser usadas en cualquier rango de pH. Dan también la reacción de "rajado de sal", que convierten una sal neutra a su base correspondiente.



como se ve el cambio de catión, por una base fuerte, puede remover todos los compuestos iónicos.

Entre sus varias aplicaciones, se tiene la desalcalinización; extracción del uranio que recubre las vetas de ciertos minerales; remoción del azufre y mercaptanos de los hidrocarburos; cromado; catalisis y varias más.

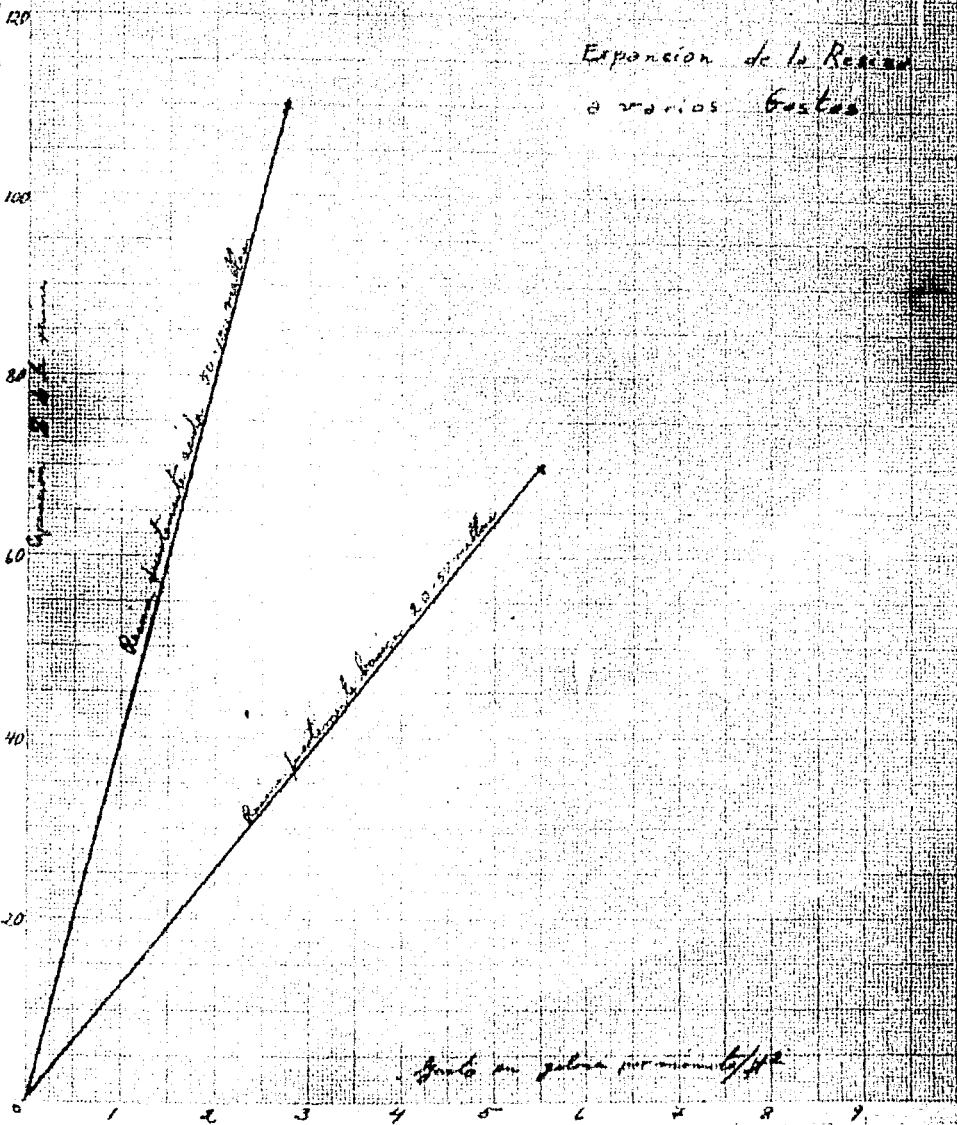
Las características de esta resina, son:

Tipo .....	cambiador aniónico fuertemente básico.
Grupo activo .....	dimetil etanol-benzil amonio.
Ligadura estandar (% divinilbenceno) .....	8%
Forma iónica de cambio .....	Cl <sup>-</sup>
Forma física .....	esférica
Tamaño estandar (húmedo) .....	20-50.
Tamaño especial (seco) .....	50-100; 100-200; 200-400.
Densidad lbs ft <sup>3</sup> .....	44
% cambio de volumen .....	Cl <sup>-</sup> → OH <sup>-</sup> = 14%.
Rango de pH efectivo .....	0—4
Selectividad .....	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup> = aprox. 1.5.

Figura 3

(18)

Expansión de la Resina  
a varios Grados



Orden de selectividad de iones . . . . .  $I > NO_3 > Br > Cl >$   
 $OH > acetato > F$

*Capacidad total de cambio:*

Como $CaCO_3$ en Kg/ft <sup>3</sup> . . . . .	29
Meq/g (resina seca) . . . . .	3.5
Meq/ml (resina húmeda) . . . . .	1.33
Esfericidad en % . . . . .	> 85
Expansión de cama . . . . . 50% máx.; 2 gpm ft <sup>2</sup> a 25° C.	
Abatimiento de presión . . . . . aprox. 0.5 lbs in <sup>2</sup> ft a 5gpm ft <sup>2</sup>	

Debe hacerse notar, que la caída de presión no está en función de la densidad de la resina, por tanto, la gráfica de la figura 2, es aplicable tanto a cambiadores catiónicos como aniónicos.

Asimismo, se nota que el lavado de una cama de resina, provoca una expansión, que depende de la gravedad específica de la resina, el flujo empleado, y el tamaño de la resina. En la figura 3, se dan las expansiones a varios flujos, con partículas de diferente medida y densidad, usando agua a 25° C.

Es interesante en ambas resinas aclarar el concepto de la Ligadura: Se llama Ligadura, a la cinta formada por las cadenas lineares del polímero en la matriz de una resina cambiadora con un agente ligante, el cual produce un copolímero insoluble, de estructura tridimensional. El grado de ligadura en un compuesto estireno-divinilbenceno, está dado por la fracción de divinilbenceno que contiene. Así, por ejemplo, una resina de 4% de ligadura, es un compuesto que contiene 4% de divinilbenceno y 96% de estireno y otros monómeros de vinilo. El divinilbenceno contribuye al trabajo tridimensional del polímero, haciéndolo insoluble.

La fracción de divinilbenceno, determina el hinchamiento y encogimiento de la resina. Así, aunque la resina contenga una fracción muy pequeña, es insoluble y puede hincharse como una masa gelatinosa tomando varias veces su peso en agua. Contenidos de 30-40% de divinilbenceno, dan una ligadura muy cerrada, lo que dificulta hacer resinas.

La cantidad de ligaduras afecta la resina en dos formas:

Al aumentar las ligaduras, la capacidad de la resina aumenta; este aumento en la capacidad, resulta de la presencia de un gran número de anillos bencénicos disponibles para activarse; no obstante este efecto es menor, comparado con el contenido de agua. Así, cuando se aumentan las ligaduras, la resina tiene un hinchamiento menor para el mismo número de lugares (valencias, captantes, etc.) y la capacidad sobre el volumen neto se aumenta. La capacidad de las resinas aniónicas está dado por el radical  $Cl^-$ .

Otras propiedades se afectan por la cantidad de ligaduras, si las ligaduras disminuyen y la resina se hincha, la difusión de los iones en la resina, es más rápida. Esto da relaciones de equilibrio más rápidas especialmente cuando se trata de grandes iones. Esto ofrece la posibilidad de separación, basándose en el tamaño del ión. Como se ve, la selectividad de la resina, es función en gran parte del tamaño del ión. Así, cuando las ligaduras disminuyen, la estructura se hace más porosa y permeable, por lo cual, las diferencias de selectividad también disminuyen.

Las ligaduras, afectan también las propiedades físicas de la resina. Las resinas de bajas ligaduras, se hinchan fácilmente, lo cual las hace blandas y fácilmente deformables. Las resinas de muchas ligaduras, son quebradizas.



*CAPITULO II*  
TRABAJO EXPERIMENTAL.

## 1.—APLICACION DE LOS CAMBIADORES IONICOS EN LOS METODOS ANALITICOS DE AGUAS:

### a) Preparación de cartuchos con cambiadores iónicos:

Para la preparación de los cartuchos, deben tomarse en cuenta los factores estudiados anteriormente. El flujo, debe de ser, un factor importante. En este caso particular, se usó un flujo de 5 litros por minuto por metro cuadrado de área seccional de cama de resina. Gastos mayores, resultaron imprácticos por ser muy corto el tiempo de contacto entre las fases, lo que provocaría, la necesidad de pasar una gran cantidad de agua a través de los cartuchos.

Físicamente, el cartucho consta de dos cilindros de tubo de plástico de tres centímetros de diámetro. Están unidos en la parte superior por una T invertida que puede ser de vidrio, de plástico, o de hule. Dentro de los cartuchos, se ponen dos láminas de material poroso, que sirve de asiento a la resina, y al mismo tiempo, trabaja como elemento filtrante, evitando el paso de materia que podría taponar el cartucho, o interferir en alguna forma el contacto entre la resina y el agua.

El peso del cartucho es bajo, y el espacio que ocupa, es pequeño. Esto facilita su manipulación, acarreo, y envío a lugares distintos. Eliminando el riesgo y la voluminosidad de la botella.

Como elemento filtrante, se usó en un principio tezontle; se sustituyó después por malla de nylon de tejido fino y poroso, con excelentes resultados.

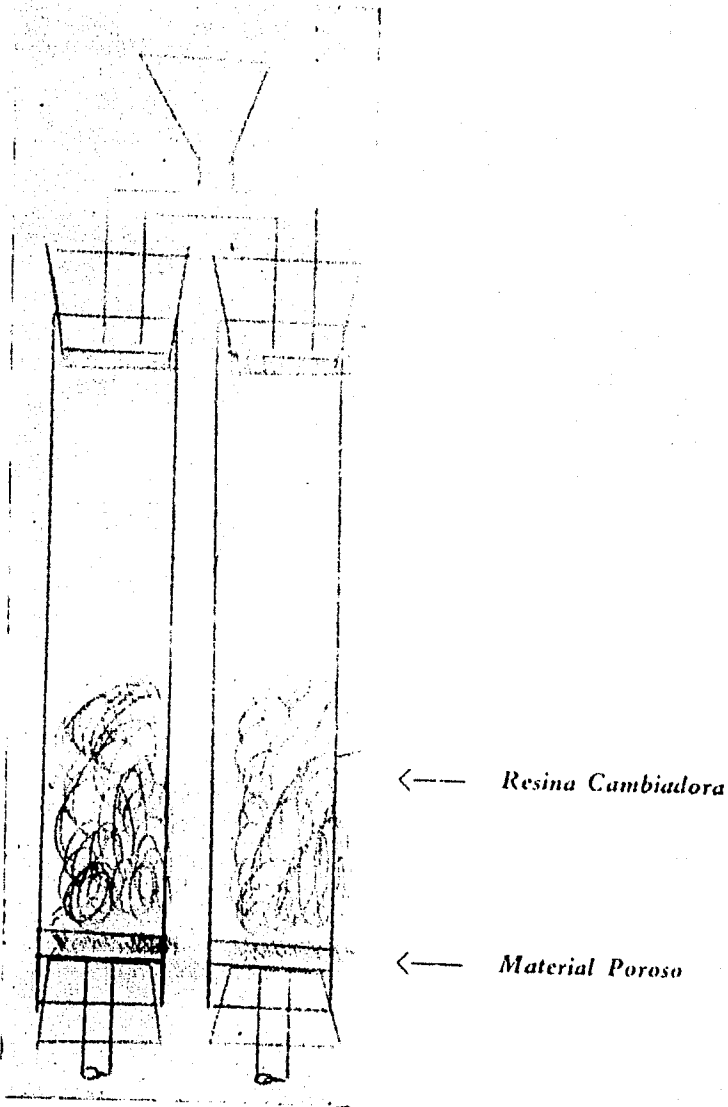
La longitud del cartucho empleado, fue de diez centímetros, la altura de la resina fue de cinco centímetros únicamente, para permitir la expansión del volumen de resina.

### b) Técnica de muestreo de agua en el campo:

Se sabe, que la muestra, debe ser la parte representativa de un todo, de ahí la importancia de un buen muestreo. La aplicación principal de este trabajo, vino de estudios geoquímicos del subsuelo del Valle de México. Este tipo de estudios requieren de la acumulación del mayor número de datos posibles, los cuales indicaran, con una precisión proporcional, la composición de las distintas capas por las que fluye el agua. Datos de esta composición, se pueden obtener en la perforación de pozos; sin embargo cuando alguna

FIGURA 4

DIAGRAMA DE LOS CARTUCHOS CAMBIADORES



barrera o una falla del subsuelo se interpone, no es fácil determinarlo, pues en el campo, las distancias entre perforaciones son muchas veces de kilómetros, por lo que el terreno intermedio, resulta la más de las veces desconocido. Los arrastres provocados por las corrientes subterráneas van variando la concentración de las sales solubles por intercambios con las diferentes composiciones de los cuerpos que atraviesa, de ahí la importancia de obtener una muestra exacta. La selectividad de las resinas cambiadoras de iones y el % de intercambio de las mismas, las hace aptas en este tipo de muestreo. Se cita un caso, en que el agua 28 veces destilada, tiene un grado de pureza ligeramente mayor, que el de un agua tratada con cambiadores de iones (3).

Cuando es necesario, se pueden enviar cartuchos a lugares distantes sin importar la capacidad del muestreador.

La técnica en sí es sencilla, y puede encerrarse en un instructivo que se envía con los cartuchos. Las instrucciones serán:

- 1) Pasar cinco litros de agua a través del cartucho. (El recipiente vertedor será lavado perfectamente, y un mínimo de cinco veces con el agua por muestrear).
- 2) Sellar el cartucho, y enviarlo con los siguientes datos:
  - a) Muestra N° ..... localización ..... fecha .....
  - b) Tiempo, o cantidad de agua que se pasó a través del cartucho.
  - c) Si el agua es de pozo, profundidad del mismo.
  - d) Nivel estático ..... Nivel freático .....
  - e) Gasto actual del pozo.
  - f) Observaciones.

Todos estos datos se anexan al análisis que se efectúe.

### c) *Extracción de los iones, y regeneración de los cartuchos:*

La técnica de extracción en este caso tiene una doble función, al pasar la solución regeneradora, los iones adsorbidos por la resina, salen en solución al intercambiarse por los iones de la solución regeneradora, siguiendo las reacciones vistas en capítulos anteriores. En la misma forma, la resina queda útil para ser empleada nuevamente.

Las soluciones empleadas en la regeneración, fueron:

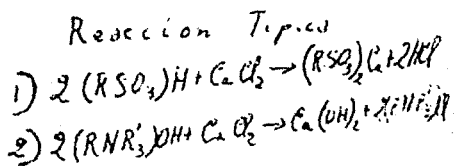
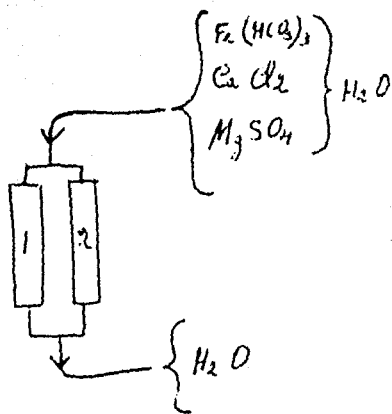
Solución de ácido clorhídrico al 5%.

Solución normal de hidróxido de sodio.

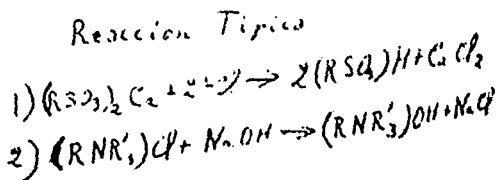
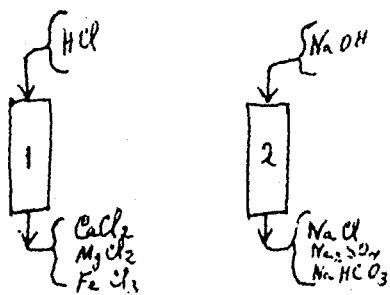
Solución de hidróxido de sodio al 4%.

FIGURA 5

"Extracción"



"Regeneración"



Solución normal de ácido clorhídrico.

Solución décimo normal de nitrato de plata.

Para la extracción, se separan los cartuchos. A través de ellos, se hace pasar la solución de hidróxido de sodio al 4%. (Fig. 5).

Para el control de la reacción, o sea para saber cuándo se han extraído totalmente los iones adsorbidos, se van haciendo titulaciones periódicas en el afluente del cartucho. Estas determinaciones se hacen cada veinte, cincuenta o cien mililitros. Se usan las soluciones valoradas para detectar el paso de los iones de la solución regeneradora. Se tiene asimismo un dato para poder determinar cuantitativamente el exceso de solución agregada.

Una mayor comprensión de estas titulaciones, se tendrá en el capítulo referente a la técnica seguida para conocer el comportamiento de las resinas cambiadoras con los iones borato.

## 2.—TECNICA ANALITICA

La solución obtenida en la extracción de los iones se afora con agua destilada (se empleó asimismo agua bidestilada pero los resultados no se afectaron). El volumen del aforo, se hará de acuerdo con la cantidad de muestra necesaria para las determinaciones analíticas, siendo ésta una de las ventajas principales del método. Ciertamente, la cantidad necesaria de solución para regenerar la resina cambiadora de iones, y por ende, para extraer los iones retenidos, es siempre mucho menor a la solución inicialmente deionizada, esto permite tomar en el análisis alícuotas menores en las que la concentración de iones es mayor, y por tanto, la exactitud de las determinaciones aumenta.

En este análisis, se empleó el método Illescas con algunas modificaciones. En general, los métodos fueron colorimétricos empleándose un fotocolorímetro Klert y un electrofotómetro de flama. Por no ser parte fundamental de la tesis, a continuación se relata brevemente la técnica analítica empleada en el análisis típico de la figura 6.

Sólidos totales: Pueden emplearse dos métodos, el primero, es por conductividad eléctrica. Una solución, será más o menos conductora dependiendo de su concentración en iones. En un vaso con dos polos para permitir el paso de corriente, se pone agua destilada para poder calibrar el galvanómetro; hecho esto, se pone la muestra problema y se toma su lectura. El contenido en sólidos, se obtiene de gráficas previamente hechas para diferentes concentraciones de iones. El segundo método, que siempre se hizo como dato comprobatorio consistía en la evaporación de una alícuota de la muestra en una cápsula de porcelana.

Dureza Total y Dureza Permanente: Se empleó el método llamado Durotest (2).

## FIGURA 6

### ANALISIS TIPICO

#### MUESTRA DE AGUA N° 1

	<i>ppm</i>	<i>meq/lit</i>
Sólidos totales	1495.6	0.0
Dureza total (como carbonato de calcio)	426.9	8.5
Dureza permanente (carbonato de calcio)	118.0	2.3

#### ANIONES

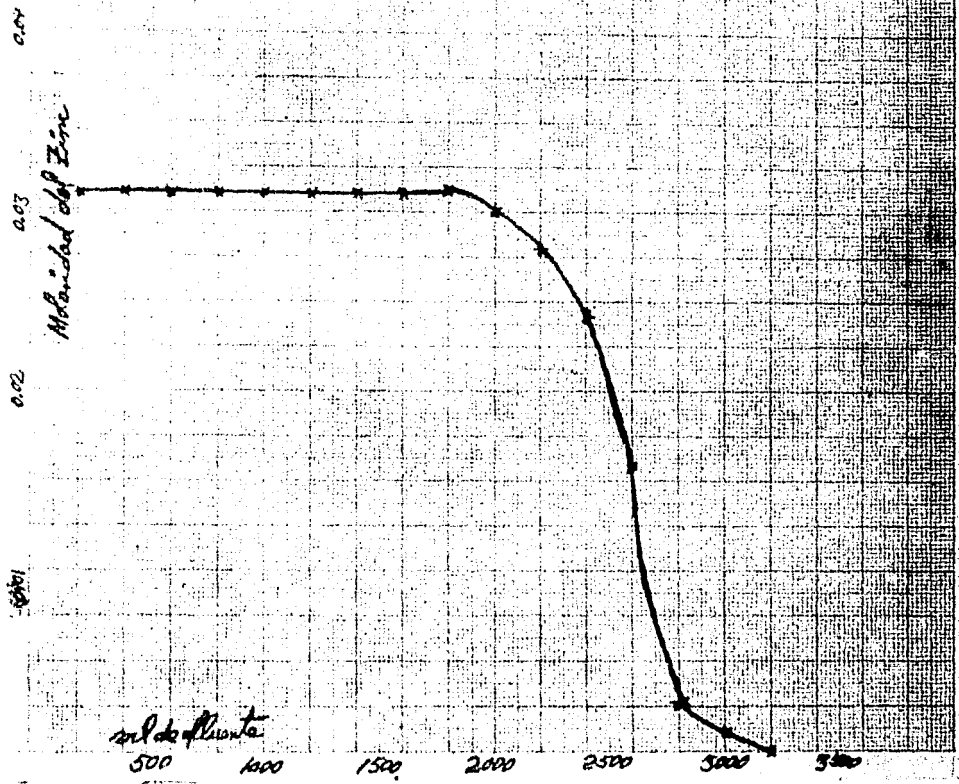
Carbonato (ión $\text{CO}_3^{--}$ )	0.0	0.0
Bicarbonatos (ión $\text{HCO}_3^{--}$ )	841.8	13.8
Cloruros (ión $\text{Cl}^-$ )	166.8	4.7
Sulfatos (ión $\text{SO}_4$ )	25.2	0.5

#### CATIONES

Calcio (ión $\text{Ca}^{++}$ )	56.0	2.8
Magnesio (ión $\text{Mg}^{++}$ )	68.4	5.7
Hierro (ión $\text{Fe}^{++}$ )	0.14	0.002
Metales pesados	0.0	0.0

Figura 7

Curva de Adsorción  
del ion Zinc





Cloruros: Se determinan por métodos Argentométricos (7).

Sulfatos: Se determinaron por Turbidimetría.

Bicarbonatos: Se determinan por titulación, usando naranja de metilo como indicador (7).

Fierro se determina como ión ferroso por colorimetría (2), (6).

El cálculo de los iones contenidos en una muestra, se obtenía en gráficas previamente hechas, con factores específicos para cada titulación. El resultado estaba dado en partes por millón.

### 3.—*Estudio de la adsorción de iones borato y metales pesados:*

En aguas magmáticas, aparece el ión borato como elemento indicativo. Para obtener los porcentajes de adsorción del ión borato, se hizo un estudio de laboratorio, para lo que se emplearon varias soluciones. Estas determinaciones fueron necesarias por no haberse encontrado en la literatura consultada, datos útiles acerca de la adsorción de trazas de iones borato, por las resinas cambiadoras de iones.

Al hacer un estudio comparativo de las gráficas de comportamiento de las resinas cambiadoras de iones usadas, con otros iones, se encontró que el anión borato, era adsorbido en forma muy similar que el zinc. Fue por esto que se trabajó con una solución de sulfato de zinc, por ser más rápido su análisis con la técnica analítica empleada, para la determinación turbidimétrica del zinc. En la figura 7, se ve la gráfica de adsorción de una solución 0.0302 molar de sulfato de zinc. Se ve, que el intercambio iónico entre una solución que contiene iones borato o iones de zinc, no es inmediato al paso de la solución, sino que se necesita pasar una determinada cantidad de ésta para que el intercambio iónico empiece. La adsorción se determina por análisis periódicos del afluente. Estas determinaciones, se hacen del zinc remanente en la solución que sale del cartucho. De esta forma se vio, cómo la adsorción aumentaba a medida que pasaba mayor cantidad de solución. Por ser las reacciones entre las resinas cambiadoras de iones y los iones pasados a través de ellas, reversibles, debe tomarse en cuenta el por ciento de iones adsorbidos en un volumen determinado. Es decir, para el cálculo de las diferentes concentraciones de iones en una muestra, debe tomarse en cuenta el volumen necesario para la adsorción óptima de un ión determinado.

### 4.—*Interpretación de Resultados:*

El trabajo, fundamentalmente, consistió en dos partes, primero, el estudio del aspecto teórico como fundamento de la técnica y segundo, la aplicación práctica.

Sería largo enumerar el trabajo total realizado, basta decir, que se hicieron no menos de quinientos análisis. A continuación, se relata lo que se consideró un día normal de trabajo: Para dar salida a las aguas negras a través de las colinas y montañas que rodean el Vallé de México, existen dos túneles, el túnel viejo que data de fines del siglo pasado; el túnel nuevo se construyó alrededor de 1940, pues el crecimiento de la Ciudad de México, había hecho insuficiente aquél. Después de unos quince años de uso del túnel nuevo, al realizarse aforos periódicos de control, se observó que el caudal del túnel nuevo aumentaba entre la entrada y la salida en una cantidad que variaba de uno a tres metros cúbicos, dependiendo de la época del año en que se efectuaba el aforo. Se sabía por esto que había filtraciones, pero se desconocía el origen de las mismas, si éstas eran de agua de lluvia o de riego, se hacía posible su reuso en el Valle, pudiéndose abastecer una población de unos doscientos mil habitantes, aliviando en esta forma la crítica carencia de agua. El estudio era por tanto interesante.

Se realizó el muestreo, que duró once horas. El túnel que estaba cerrado al paso de aguas negras desde hacía seis meses, y el agua que corría por él era clara y transparente. El túnel tiene tres metros de diámetro y una longitud total de 12,300 metros. El primer muestreo, se realizó en la boca misma del túnel. Con un frasco de cinco litros de capacidad lavado perfectamente con el agua por muestrear, se hizo pasar su contenido a través del cartucho, que se marcó Muestra No. 1: cota 0.0 metros. Se hizo también el aforo del gasto de agua que fue de cien metros por segundo. La parte del túnel, correspondiente a los dos primeros kilómetros, el caudal y las filtraciones eran mínimos, por lo que se tomó una muestra cada trescientos metros en promedio; siguiéndose para este muestreo la misma técnica que para la muestra No. 1. A medida que las filtraciones aumentaron, se aumentó la secuencia del muestreo. Se tomaron en total ciento veinte muestras.

Este, fue el primer paso para el análisis del agua del túnel, los datos de los aforos y gastos de agua obtenidos, son aproximadamente de un aumento promedio de 225 litros por cada kilómetro de longitud del túnel. Como ya se dijo, éste fue solamente uno de los 500 muestreos, correspondiendo al mayor de ellos, y el primero en que se empleó la técnica descrita. Anteriormente, se realizaban los muestreos siguiendo el uso convencional de la botella. Fue la acumulación de muestras, la rotura de algunas botellas y todos los problemas inherentes, lo que hizo pensar en un método más práctico; siendo el caso anterior, una demostración del uso y ventajas que se podían obtener usando resinas cambiadoras de iones.

La interpretación de resultados, o trazo geoquímico, en el caso anterior fue el siguiente: Se obtiene en primer lugar un plano de la zona muestreada. En él, se localizan las muestras y se van enumerando los puntos donde se realizó el muestreo. Ya realizado el análisis, se van anotando las diferentes concentraciones obtenidas. Van apareciendo sobre el plano, curvas que se unen por la igualdad o afinidad de concentraciones de iones idénticos. Al final del estudio, se obtienen curvas semejantes a las curvas de nivel, que

ayudan para la localización de las diferentes corrientes que cruzan el subsuelo, con esto se localizan fácilmente las diferentes fallas y barreras. En el Capítulo III.—Aplicaciones, se ve en qué forma el trazo geoquímico se emplea en la práctica. Es desde luego fundamental un buen muestreo para este tipo de trabajos, pues conclusiones erróneas podrían acarrear la erogación de fuertes sumas de dinero sin resultados prácticos.

*CAPITULO III*  
**APLICACIONES**

A últimas fechas, en los países más adelantados en el campo de la ciencia y principalmente en Estados Unidos y Rusia, se ha dado un gran incremento a la Geoquímica. La Geoquímica, tiene su principio con la tierra como una masa ígnea. Es entonces, cuando los acomodamientos de las grandes masas, con su gran gama de afinidades y los englobamientos, van formando una secuencia de cuerpos, que con el paso del tiempo se nos muestran como formaciones geológicas. En el caso particular del agua, al pasar por diferentes formaciones, va arrastrando y disolviendo un gran número de sales. La debida interpretación de estos contenidos, nos lleva a conclusiones de lo más variadas, que van desde el hallazgo de mantos petrolíferos, hasta el de material radioactivo.

Es muy conocido el grave problema que afronta la Ciudad de México por el hundimiento paulatino de determinadas zonas. Autoridades en Mecánica de Suelos, se han interesado en un problema que se va agudizando con el tiempo. En esta situación se presentó la posibilidad del estudio geoquímico, de un problema que era si la Ciudad estaba asentada sobre un solo manto acuífero, o bien, si dicho manto estaba dividido en subcuencas, perfectamente delimitadas que permitieran la extracción de agua en determinadas zonas, sin provocar hundimientos en otras; este último caso, presentaba posibilidades en la rehidratación del subsuelo, salvando una planificación por valor de cientos de millones de pesos.

Un concienzudo estudio a través de cientos de pozos, fue marcando la delimitación de barreras que formaban las sub-cuencas. Se presentaba así, una solución del agudo problema. En el muestreo de estos pozos, fue donde se presentó la necesidad de una forma práctica de muestreo que evitara problemas tales como los que se presentaban cuando se obtenían varias muestras en un día; era muy difícil analizarlas todas inmediatamente, lo que provocaba en algunos casos que el agua cambiara su composición, la manipulación de las muestras era engorrosa, y se daban también errores por contaminación en el muestreo. Todas éstas eran pequeñas dificultades que retrasaban y entorpecían un trabajo en sí difícil. La aplicación de los cartuchos, eliminaba los problemas anteriores, permitiendo además, llevar una historia del muestreo.

En el campo, fue donde el sistema de cartuchos cambiadores, presentó mayores ventajas, ya que muchas veces era necesario recorrer grandes distancias incluso a pie, lo que hacía muy difícil llevar cincuenta o cien fras-

cos, en contraposición, era fácil llevar una maletín ligero que contenía los cartuchos.

La versatilidad de las resinas cambiadoras de iones, las hace aplicables no sólo en el estudio del agua, sino también para analizar sales en tierras, disolviéndolas previamente en agua; de la misma manera, por dilución pueden hacerse estudios geológicos y de minas.

*CAPITULO IV*

CONCLUSIONES

Del trabajo descrito anteriormente se puede concluir:

- 1) El muestreo aplicando cambiadores de iones, tomando sistemáticamente como método de control de aguas potables y minerales, en el caso tratado, soluciona el problema de dicho control. Por ejemplo en el caso citado del muestreo del túnel, otros métodos convencionales de muestreo no hubieran sido operantes.
- 2) Los cartuchos con cambiadores iónicos facilitan el muestreo y el traslado de las muestras. De hacer esto mediante botellas, se requeriría un gran número de éstas y habría sido muy difícil su transporte. Un número menor de muestras podía llevar a conclusiones erróneas, por no ser un muestreo representativo.
- 3) Se eliminan posibilidades de error, debido a la inestabilidad de las muestras, principalmente por desarrollo de microorganismos.
- 4) Permite una mayor exactitud de los resultados, pues en la extracción, la dilución puede ser la mínima necesaria para las determinaciones, lo cual da una mayor concentración de iones en una alícuota y de ahí su mayor grado de exactitud.



## BIBLIOGRAFIA

- 1) *Cadmon & Kressman, T. R. E. Editores, "Ion Exchangers in Organic and Biochemistry", Interscience Publishers, New York, 1957.*
- 2) *Illescas, F. B. "Apuntes de Análisis Cuantitativo".*
- 3) *Industrial Water Conditioning.*
- 4) *Kunin, R. "Ion Exchange Resins", 2a. edición, John Wiley and Sons, New York, 1958.*
- 5) *Nachod, F. C. and Schubert, Editores, "Ion Exchange", Academic Press, New York, 1949.*
- 6) *Molina, B. R. Comunicaciones personales.*
- 7) *Orozco. "Análisis Químico Cuantitativo".*
- 8) *Salmon, S. E. and Hale, D. K., "Ion Exchange-a Laboratory Manual", Academic Press, New York, 1959.*
- 9) *Samuelson, O., "Ion Exchanger in Analytical Chemistry", John Wiley and Sons, New York, 1953.*

## BIBLIOGRAFIA

- 1) *Cadmon & Kressman, T. R. E. Editores, "Ion Exchangers in Organic and Biochemistry", Interscience Publishers, New York, 1957.*
- 2) *Illescas, F. B. "Apuntes de Análisis Cuantitativo".*
- 3) *Industrial Water Conditioning.*
- 4) *Kunin, R. "Ion Exchange Resins", 2a. edición, John Wiley and Sons, New York, 1958.*
- 5) *Nachod, F. C. and Schubert, Editores, "Ion Exchange", Academic Press. New York, 1949.*
- 6) *Molina, B. R. Comunicaciones personales.*
- 7) *Orozco. "Análisis Químico Cuantitativo".*
- 8) *Salmon, S. E. and Hale, D. K., "Ion Exchange-a Laboratory Manual", Academic Press, New York, 1959.*
- 9) *Samuelson, O., "Ion Exchanger in Analytical Chemistry", John Wiley and Sons, New York, 1953.*