

05.70.17

SAN JUAN
República Argentina



aplicación de radioisótopos
en hidrología
6º curso regional

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

APLICACION DE RADIOISOTOPOS EN HIDROLOGIA

6to CURSO REGIONAL

TRITIO Y RADIOCARBONO APLICADOS A HIDROLOGIA

Manuel Levín

San Juan - 13 de octubre al 20 de noviembre de 1970

REPUBLICA ARGENTINA

TRITIO Y RADIOCARBONO APLICADOS A HIDROLOGIA

Manuel Levín
Investigador Asociado
Facultad de Ciencias Naturales y Museo
Universidad Nacional de La Plata

CARBONO 14

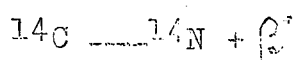
INTRODUCCION.

Si bien en particular, veremos la aplicación de los análisis de ^{14}C y algunas de sus aplicaciones en la solución de problemas hidrogeológicos, entiendo como muy importante considerar antes algunos aspectos concernientes a la datación de ^{14}C en general.

El término Radiocarbono en general se refiere a un isótopo del carbono, ^{14}C , el cual tiene un semiperíodo de desintegración de 5.700 años (Godwin 1962). Los átomos de Radiocarbono son continuamente producidos en la atmósfera por interacción de neutrones cósmogénicos con nitrógeno; la producción de ^{14}C es:



y la reacción de decaimiento es:



Los átomos de ^{14}C son luego oxidados a dióxido de carbono, el cual se mezcla con el dióxido de carbono de la atmósfera. Como estos procesos se van produciendo en tiempos muy grandes, la producción de radiocarbono y su decaimiento están en equilibrio, lo que significa que la proporción de producción y decaimiento son las mismas. Sobre la base de estos fenómenos Libby emprendió sus investigaciones en la Universidad de Chicago y con ellas obtuvo el premio Nobel de 1960.

Las partículas β^- emitidas por el ^{14}C tienen una energía máxima de 156 Kev. En la naturaleza el ^{14}C se halla junto a dos isótopos estables del carbono, ^{12}C y ^{13}C . El carbono natural, es el ^{12}C (98,9%); el ^{13}C se encuentra en un 1,1 % y el ^{14}C en solamente $1,18 \times 10^{-10}$ %.

A fin de establecer un método para la datación del ^{14}C , Libby estableció lo siguiente:

- 1.- Los átomos de carbono en un reservorio dinámico, el cual incluye: la atmósfera, el océano y otros cuerpos de agua como así también la materia orgánica viviente o en decaimiento, están en equilibrio.
- 2.- El flujo de rayos cósmicos ha sido constante por un período de tiempo muy largo.

3.- Que no hubo modificaciones en el reservorio dinámico de carbono durante ese tiempo.

Considerando como válidas las hipótesis planteadas, sería posible medir en que tiempo una muestra de carbón fué separada del reservorio dinámico, midiendo la diferencia de actividad en ^{14}C de la muestra y la del carbono del reservorio. Libby y sus colaboradores demostraron que la distribución del ^{14}C en el reservorio dinámico de carbón es uniforme y que las edades de las muestras de edad conocida coinciden con las edades de ^{14}C , considerando por supuesto el error experimental. De esta manera se estableció el método de datación de ^{14}C .

La edad de la muestra se calcula por medio de la fórmula derivada de la ley de decaimiento radioactivo:

$$t = 13,5 \times 10^3 \log \frac{A_0}{A}$$

t = edad de la muestra en años.

A₀ = Actividad específica del estandar moderno -1950 (95% de la actividad específica del ácido oxálico NBS estandar).

A = Actividad específica de la muestra.

Como consecuencia de la gran cantidad de trabajos que se han venido realizando, se ha observado ciertas desviaciones de lo asumido anteriormente. Entre ellos podemos considerar:

A) Efecto de Suess:

Este observó que en dataciones de árboles correspondientes a la finalización del siglo XIX, eran menores que aquellas realizadas para árboles que se habían desarrollado en el siglo XX. El atribuyó esta anomalía a la adición de dióxidos de carbono a la atmósfera por la combustión del petróleo que no contiene radiocarbono, pues ellos fueron removidos del reservorio hace millones de años. Este efecto haría aparecer a una muestra de la primera mitad del siglo XX, mucho mas vieja que su verdadera edad.

B) Efectos producidos por explosiones atómicas:

Con el avance de las explosiones, los átomos de ^{14}C fueron producidos artificialmente e introducidos en el reservorio. En el presente el contenido de ^{14}C de la atmósfera es 60% mas que el normal. Por lo tanto es obvio considerar que afortunadamente no es necesario la datación de ^{14}C para bombas pos bombas, pero si debe hacerse un ploteo cronológico del contenido de radiocarbono en el sistema de carbono y de esa manera se podrá tener una idea de las fluctuaciones del radiocarbono en el material a datar en el futuro. Entre otros investigadores Rafter, Libby, De Vries, Broecker, etc estudiaron este fenómeno.

C) Variaciones seculares:

DeVries en 1953 reveló cierto desacuerdo entre la dendrología (cronología realizada por los anillos de las plantas) y

el método de ^{14}C . El observó que las actividades de ^{14}C mostraban desviaciones de corto término con respecto a los valores esperados y que esas desviaciones diferían de acuerdo a la edad y lugar de la muestra. Otros investigadores posteriormente consideraron que las causas posibles podrían ser: variaciones en las temperaturas de los océanos, influencia de la actividad solar y cambios geomagnéticos.

Los efectos mencionados sin duda son de fundamental importancia, pero afortunadamente muchos investigadores se dedicaron a buscar los factores de corrección necesarios para poder realizar una datación de ^{14}C en forma absoluta. Finalmente las experiencias realizadas se traducen en una serie de fórmulas con sus respectivos factores de corrección. Una de las más utilizadas es la presentada por Broecker y Olson (1959, 1961), donde establecen que la desviación de la edad de ^{14}C de una muestra de edad conocida es:

$$\Delta^{14}\text{C} = \delta^{14}\text{C} - (2 \delta^{13}\text{C} + 50) \left[1 + \frac{^{14}\text{C}}{1000} \right]$$
$$\delta^{14}\text{C} = \frac{A^f - A_0}{A_0} \times 1000$$

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{R_s - R_{\text{FDB}}}{R_{\text{FDB}}} \times 1000$$

A^f = Actividad específica de la muestra corregida por decaimiento
 A_0 = 95% de la actividad específica del ácido oxálico NBS estandar
 R_s = Relación isotópica de $\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}$ en la muestra.

Sistemas de datación.

Para entender bien los métodos existentes en la actualidad para datación de ^{14}C , deberíamos tratar el tema en detalle, pero considerando que ello es sumamente específico solo conviene recordar que para lo que a nosotros nos interesa, es decir la datación de ^{14}C en aguas, las dataciones pueden hacerse en fase líquida o en fase gaseosa. En el primer caso como ustedes han visto, se puede utilizar el espectrómetro de centelleo líquido (la forma más generalizada es sintetizando benceno). Por otra parte las dataciones de ^{14}C en fase gaseosa son las más frecuentemente utilizadas por los distintos laboratorios del mundo. El método consiste en preparar a partir de la muestra de agua recogidas, CO_2 , metano etano u acetileno (hay varios métodos para la preparación de estos gases) y luego el conteo se realiza en un contador proporcional.

APLICACION DE LAS TÉCNICAS DE DATACION DE RADIOCARBONO EN ESTUDIOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

La aplicación de ^{14}C en aguas subterráneas, a pesar de la gran cantidad de experiencias realizadas, podría considerarse

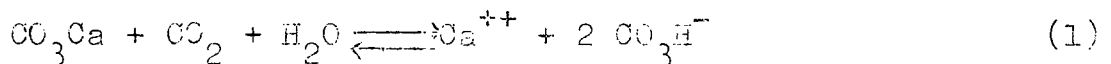
en una etapa de ensayos, sumamente positiva por cierto, por los resultados alcanzados. Actualmente se discute cuales son los mé todos y correcciones mas convenientes para poder obtener una se rie de parámetros hidrológicos en la forma mas absoluta posible. Muchos son los investigadores que están trabajando en la solu- ción de estos problemas, destacándose entre otros: K. O. Münnich, J. C. Vogel, I. Wendt, B. Hanshaw, F. J. Pearson, etc. y de a- cuerdo a sus trabajos pasará a desarrollar algunas de sus consi- deraciones mas importantes.

1.- Concentración original e inicial de ^{14}C en aguas subterrá- neas.

El ^{14}C que se produce en la atmósfera por radiación cósmica está presente en el CO_2 atmosférico y en las plantas vivas en un nivel constante y estabilizado. La concentración relativa $^{14}\text{C} - ^{12}\text{C}$ en el material reciente es aproximadamente 10^{-12} y po- dría como el 100% de actividad moderna.

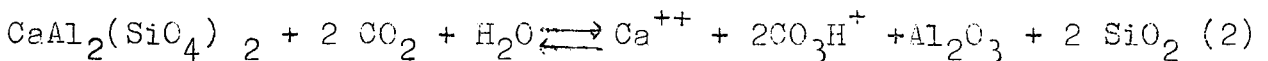
La precipitación atmosférica generalmente no contiene cañ- bonatos disueltos; el carbonato inicial disuelto en agua subte- rránea, proviene fundamentalmente del aire del suelo y de los minerales carbonatados del suelo. Se han determinado para el ai- re del suelo, valores de $^{13}\text{C} \approx -25 \%$ y 100% de la actividad moderna de ^{14}C , la cual es idéntica a la de las plantas.

La fuente mayor de los bicarbonatos de las aguas subterrá- neas se produce por los mecanismos de disolución de las calizas por la acción del CO_2 de acuerdo con la siguiente reacción:



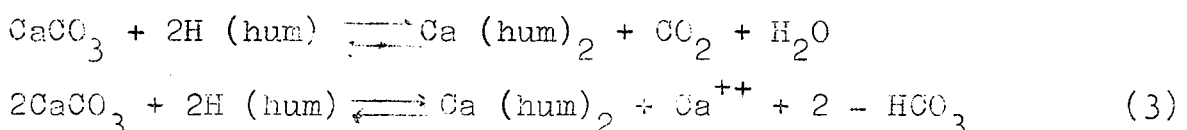
debe tenēse en cuenta que para las calizas $^{13}\text{C} \approx 0\%$ y $^{14}\text{C} \approx 0\%$ de actividad moderna.

Como proceso secundario por meteorización de silicatos se obtiene:



Si bien esta reacción por acción de las aguas subterráneas sobre las rocas produce bicarbonatos, el proceso tal cual lo e- nunciara Garrels, es lento.

Luego podemos considerar la acción de los ácidos húmicos con el CO_3Ca para producir CO_2 y bicarbonatos en solución; sien- do las reacciones:



La concentración de ácido húmico en el suelo es generalmen- te pequeña, para considerar este proceso como muy significativo,

excepto, en la zona de pantanos turbosos, donde la acidez puede volverse realmente alta.

Considerando el caso normal (ecuación 1), debemos decir que resulta importante destacar que el CO_2 , se origina de la actividad biológica de las distintas capas del suelo de la zona de recarga. Los procesos de disolución tienen lugar en las capas superiores del suelo, en donde se forma el humus. A pocos metros de profundidad, prácticamente no hay más producción de CO_2 , consecuentemente no hay disolución de carbonatos. Debemos agregar, que el calcáreo depositado generalmente, millones de años atrás, está prácticamente libre de ^{14}C , mientras que el CO_2 biogénico puede tener ^{14}C , en una cantidad cercana al contenido propio de la atmósfera (100%). Respecto a esto, diremos que este valor es teórico, ya que actualmente se ha determinado valores de 160% de actividad moderna, en el CO_2 atmosférico.

De acuerdo con la ecuación (1), se podría esperar que los bicarbonatos, contengan la mitad del ^{14}C del total de los materiales derivados de las plantas, de las cuales como dijimos deriva el CO_2 del suelo. Sin embargo, las experiencias han demostrado, que actualmente la concentración es mayor. Según Vogel, esto se debe al intercambio isotópico entre el CO_2 gaseoso y la solución de bicarbonato. Esta hipótesis, es discutida por otros investigadores, pero es evidente que, según las condiciones locales, la concentración de ^{14}C , puede lograr valores teóricos entre 50 y 100% de actividad moderna. Esto que estamos tratando, sin duda es de fundamental importancia para la datación de ^{14}C en aguas, ya que es absolutamente necesario llegar a establecer el contenido inicial de ^{14}C en la zona de estudio. Para dar una idea, si tomamos como valor inicial el 50% en lugar del 100%, nos dará una edad de las aguas subterráneas, correspondiente a un semiperíodo de desintegración de ^{14}C , o sea, 5700 años más viejas.

Además de lo expuesto, algunos autores han sostenido que, mientras el agua se halla en el reservorio subterráneo, además de disminuir la concentración de ^{14}C por decaimiento radioactivo, también puede haber disminución o dilución por la mezcla de CO_2 de origen magmático y con los calcáreos que puedan existir como parte de la roca portadora, por intercambio isotópico. Por esto, las áreas con actividad volcánica, deben ser evitadas, pues las grandes cantidades de CO_2 que pueden producirse al atacar las calizas, al mezclarse con el CO_2 del agua subterránea, diluirán el contenido de ^{14}C .

2.- Relación isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ para determinar el origen del Carbono en el agua subterránea y factor de corrección para la determinación de edad absoluta.

Como ya se explicara en ciertas circunstancias, el contenido inicial de ^{14}C es conocido, pero en otras, como en los

casos de disolución de carbonatos de calizas del suelo y del acuífero por el CO_2 biogénico y considerando que estas fuentes de carbonatos en solución no contienen ^{14}C , diluyen la concentración de ^{14}C de los derivados del aire del suelo y hacen que la muestra de agua tenga una edad mayor que la verdadera. Por ello, para obtener la edad absoluta de una muestra, es absolutamente necesario saber, que porción del contenido total de carbonato de la muestra, fué inicialmente derivado del aire del suelo. Afortunadamente el isótopo del carbono, ^{13}C , es estable y provee muy buena información al respecto. Siendo también muy importante para estos fines, la determinación del contenido total de carbonato en el agua.

La relación de los isótopos estables de $^{13}\text{C} - ^{12}\text{C}$ en la naturaleza es aproximadamente de 1 a 90 y si se presentan pequeñas variaciones en la relación establecida, se deben a fenómenos de fraccionamiento isotópico.

En la naturaleza dos importantes procesos hacen que las calizas se enriquezcan y las plantas empobrezcan en ^{13}C (Fig. 1) Por razones prácticas, las relaciones isotópicas de las calizas marinas se eligieron como estandar y las demás relaciones se dan en desviaciones por mil de esos valores. De la figura puede verse que las calizas marinas están enriquecidas en aproximadamente 3‰ y las plantas terrestres empobrecidas en 17‰ con respecto al CO_2 atmosférico. El empobrecimiento de ^{13}C por las plantas durante la asimilación de CO_2 , es un fenómeno cinético, debido a la movilidad y reactividad de la molécula del isótopo liviano. En cambio el fraccionamiento en el sistema CO_2 atmosférico-bicarbonato-carbonato sólido en el océano, es un proceso de equilibrio y en general mas pequeño que el anterior. El proceso de fraccionamiento cinético, relativamente grande observado en las plantas, ha permitido determinar el carbón derivado de materia orgánica presente en las aguas subterráneas.

En la fig. 2 puede verse a la izquierda el sistema CO_2 atmosférico-bicarbonato del océano-caliza marina. Este modelo podría aplicarse también a cualquier lago en equilibrio isotópico con la atmósfera. No es, entonces, exclusivo del océano.

En la parte central vemos la situación para aguas subterráneas en clima húmedo. El CO_2 biogénico se mezcla con la caliza en iguales proporciones resultando un bicarbonato con

$\delta^{13}\text{C} = -12\text{‰}$, subsecuentes intercambios isotópicos con la fase gaseosa, hace que el bicarbonato se empobrezca mas en ^{13}C , llegando a un $\delta^{13}\text{C} = -17\text{‰}$. El equilibrio completo dará una diferencia del 3‰ entre el CO_2 con $\delta^{13}\text{C} = -25$ y el bicarbonato. Por otra parte es importante hacer notar que los cambios de -12 a -17‰ corresponden al cambio de ^{14}C de 50 a 100% de la actividad moderna.

En este modelo también puede verse el caso de intercambio

isotópico del suelo con la atmósfera libre, resultando un desplazamiento en dirección opuesta. Sin embargo generalmente esto no ocurre.

Se muestra además la composición isotópica de los carbonatos de aguas continentales. En la parte derecha del diagrama notamos la composición isotópica de aguas termales (CO_2 de origen magmático). La misma situación se daría si los ácidos húmicos fueran responsables de la disolución de calizas. En ambos casos resultaría muy bajo el contenido inicial de ^{14}C . Pero es fácil distinguirlos de aguas subterráneas normales, midiendo la relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, pues por ejemplo como hemos dicho un $\delta^{13}\text{C} = -16\%$ indicará un contenido de ^{14}C de 80 a 90%.

Siguiendo el esquema planteado por F. J. Pearson en 1967 (este autor en el último simposio sobre Aplicación de Técnicas Isotópicas en Hidrología en marzo último, juntamente con B. B. Hanshaw, plantearon algunas modificaciones al sistema a exponer) diremos que usando la relación isotópica de los isótopos estables de carbono, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, de la dilución de carbonatos derivados de calizas marinas, podemos hallar el factor de corrección para la determinación de edades verdaderas de muestras de agua. El citado autor expresó que el factor de corrección:

$$P = \delta^{13}\text{C}_{\text{sm}} / - 25 \quad (4) \quad \begin{cases} \delta^{13}\text{C} \text{ de las plantas} = - 25\% \\ \delta^{13}\text{C} \text{ de calizas} = - 0\% \end{cases}$$

$\delta^{13}\text{C}_{\text{sm}}$ = promedio en peso de los valores de ^{13}C de los componentes (derivados de las plantas y los derivados de calizas)

otra manera de expresar la utilización del factor de corrección es

$$\begin{aligned} \% \text{ de } ^{14}\text{C} \text{ moderno (ajustado)} &= \\ &= \frac{\delta^{13}\text{C} \text{ del suelo} - \delta^{13}\text{C} \text{ de calizas}}{\delta^{13}\text{C} \text{ del agua} - \delta^{13}\text{C} \text{ de calizas}} \% \text{ de } ^{14}\text{C} \text{ del laboratorio} \end{aligned}$$

Una dificultad para usar este esquema de corrección, es el posible cambio que puede producirse en la muestra, (por intercambio isotópico como vimos) de la relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ y del contenido de ^{14}C . Para solucionar esto, en la práctica, de la determinación química del total de carbonato en la muestra puede saberse que efecto de intercambio tuvo lugar. El factor de corrección en este caso es:

$$P' = C \text{ inicial} / C \text{ total} \quad (5)$$

Las especies inorgánicas del carbón generalmente consisten en las moléculas de CO_2 pobremente hidratadas, moléculas de ácido carbónico (H_2CO_3) y los iones carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (CO_3H^-). Estos últimos predominan en la mayoría de las aguas naturales. Los carbonatos y bicarbonatos son nor-

malmente determinados hallando alcalinidad por análisis volumétricos y el contenido de ácido carbónico se determina hallando alcalinidad y PH. Estas determinaciones servirán además para el cálculo de la cantidad necesaria de agua que deberá procesarse para obtención del gas de conteo y que por supuesto dependerá del tipo de contador que se use, volumen del mismo y condiciones de conteo establecidas para un determinado laboratorio.

La expresión (5) es simplemente la relación de la concentración de carbonato que fué inicialmente derivado del aire del suelo con respecto a la concentración del carbonato total y exceptuando aquellos casos en que se incorpora CO_2 gaseoso al acuífero, será igual al factor de corrección P. Si igualamos las dos expresiones:

$$\frac{^{13}C_{sm}}{-25} = C_{inicial} / C_{total} \quad (6)$$

y luego aplicamos logaritmos, tendremos la siguiente ecuación:

$$\log C_{total} = -\log \frac{^{13}C_{sm}}{-25} + \log C_{inicial} \quad (7)$$

ésta es la ecuación de una recta de pendiente - 1 y la intersección con la ordenada nos dará el contenido de carbonato inicial.

Las determinaciones de PH y alcalinidad conviene hacerlas directamente en el campo para minimizar posibles errores en la determinación del carbonato total, debido al tiempo que puede pasar desde el momento del muestreo y los posteriores análisis en los laboratorios con las consecuentes pérdidas de CO_2 .

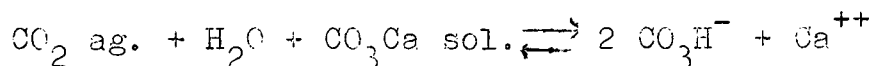
Considerando que lo expuesto es de fundamental importancia para el especialista que aplica las técnicas de datación de ^{14}C en aguas subterráneas, pienso como muy conveniente para su mayor entendimiento, un trabajo de Pearson y White publicado en Water Resources Research de 1967.

Dicho trabajo fué realizado en Atascosa en las llamadas "Carrizo Sand" del Eoceno. (ver Fig. 3). La formación tiene un rumbo casi paralelo al Golfo de México, buza hacia la costa y con agua potable hasta profundidades de 1500 m. El espesor varía de 200 a 400 m aproximadamente en la parte SE. Litológicamente consiste de una arena cuarzosa mediana a fina, con algunos componentes menores como arcillas, calcita, piritita, etc. Los pozos tienen generalmente un rendimiento de 5000 m³/día. La porosidad es del 35%. El coeficiente de permeabilidad y la transmisibilidad decrecen con la distancia y profundidad hacia el SE. Los coeficientes de permeabilidad dan un promedio de 12 m/d. El gradiente extrapolado decrece hacia el SE de 2 m/Km a 0,2 m/Km.

Las muestras se tomaron de 15 pozos para la realización de análisis químicos convencionales (aniones y cationes), para la determinación de la relación $^{13}C/^{12}C$ y para determinar ^{14}C de los carbonatos disueltos. El PH y la alcalinidad se midie-

ron en el campo para hallar el contenido total de carbonatos. Las muestras para análisis de ^{13}C (100 a 200 lts.) se prepararon atrapando el CO_2 en una solución de NH_4OH . El carbonato de amonio luego fué sintetizado y convertido en benceno y las mediciones se realizaron en un espectrómetro de centelleo líquido.

En la Fig. 4 y en la Tabla I, podemos ver los resultados de los análisis químicos. Importa remarcar de la Fig. 4 que el agua en la parte aflorante (outcrop) es marcadamente no saturada con respecto a calcita, el grado de saturación se incrementa al SE. En la parte NW tendríamos aguas del tipo de bicarbonato de calcio, cumpliéndose la reacción de la ecuación



y el contenido del agua saturada en calcita sería igual a dos veces el carbón inicial derivado del aire del suelo. Al SE de la línea de Tx 93 y Tx 94, hay una zona en la cual el contenido de carbonato total se incrementa suavemente, pero en ella el Na se incrementa bruscamente y el Ca decrece. Aquí se produce una reacción de intercambio:



las aguas que se producen entonces son del tipo de bicarbonato de Na, permitiendo que se disuelva mas CO_3Ca , decreciendo entonces los valores de $\delta^{13}\text{C}$. El Tx 96 con un $\delta^{13}\text{C} = -15 \%$, tiene un valor muy negativo pero la razón es que está ubicado próximo a una falla sobre un campo de gas natural (CO_2 derivado de petróleo con $\delta^{13}\text{C} = -30$) el que reaccionaría con calizas para dar el carbonato adicional. Por su parte el valor tan positivo de Tx 97 de $\delta^{13}\text{C} = -3,7\%$, indica que no se ha introducido CO_2 adicional derivados de las plantas, pero si que hay reacción de intercambio de Na por Ca.

En la Fig. 5 podemos ver el ploteo realizado utilizando la ecuación (7). Como se puede observar, los pozos Tx 96, 214, 218, y 219 son aguas con alto contenido en bicarbonato de sodio y no cumplen con la ecuación (7) ya que parte de sus carbonatos diluidos han sido derivados de otras fuentes que no corresponden a caliza marina. Tx 93 podría contener contaminación por CO_2 derivados de petróleo. El Tx 226 parecería que fué error de análisis. Del gráfico se puede demostrar que es real el intercambio isotópico, pero también es cierto que es tan pequeño que el autor considera que no hay que tenerlo en cuenta. De la intersección de la recta con la ordenada obtuvieron el valor de C inicial el cual es $2,2 \pm 0,12$ epm. y que prácticamente coincide con el valor de 2,5 epm. obtenidos del contenido de carbonato total de las aguas de la región, bicarbonatadas de calcio y saturadas de calcita.

En la Fig. 6 se han dibujado las isocronas con sus respectivos errores y las edades se expresaron en números redondos

hallados por interpolación. Puede verse además la línea de perfil donde se ha medido velocidad (ver Fig. 7). El método para el cálculo de velocidades consiste en el cálculo del tiempo que ha pasado desde que el agua ha dejado el área de recarga, o de otra manera es la determinación de la edad del agua. El valor absoluto se obtienen dividiendo simplemente la distancia entre pozos por la diferencia de edad de ^{14}C . Como puede verse hay muy buena concordancia entre las velocidades halladas por los métodos convencionales hidrogeológicos y el método de datación, razón sin duda importante como para considerar como importante este método, pues no debemos olvidar lo difícil que resulta la determinación de los parámetros tales como: coeficiente de permeabilidad, transmisibilidad, porosidad, gradiente hidráulico, los que deben medirse en varios puntos de un acuífero, el que a su vez debe considerarse con condiciones muy especiales, como homogeneidad e isotropía.

Por su importancia pasaremos ahora a analizar el modelo que planteara Vogel para una de las aplicaciones más importantes de la datación de radiocarbono. Específicamente nos referiremos a la determinación de la recarga en un acuífero, que también puede ser hallada haciendo datación de Tritio.

Para determinar la recarga a partir de velocidades medidas, a lo largo de una línea de flujo, debe distinguirse muy bien entre acuíferos confinados y no confinados. En los primeros con K uniforme, normalmente no hay estratificación de edad y la edad que se considera en el perfil se incrementa uniformemente en la dirección del flujo. Esto mismo ocurriría para un acuífero no confinado que no se recarga en superficie.

Para acuíferos no confinados, sabemos que se recarga por precipitación u otras fuentes superficiales, lo que hace que haya estratificación de edades. Considerando este caso, supongamos un acuífero con una profundidad constante, el cual ha sido recargado por precipitación sobre toda el área y que el agua se escurra a través de una vertiente. Como la extensión horizontal del acuífero es por lo general muy grande comparada con la profundidad del mismo, la velocidad en cualquier parte del acuífero es prácticamente horizontal, excepto en la vertiente (Fig. 8). De acuerdo con la ley de Darcy, la velocidad horizontal es:

$$v = dl/dt = K dh/dl$$

K = coeficiente de permeabilidad.

El caudal Q a través de una sección S es igual a la cantidad total de recarga efectiva sobre el área a corriente arriba de S

$$Q = R \cdot A$$

R = proporción de recarga.

Como Q es igual al volumen de agua que pasa por S en la

unidad de tiempo

$$c = dV/dt = H da/dt$$

α = porosidad

H = profundidad total del acuífero

$$W \cdot a = \alpha H da/dt$$

integrando

$$t = \frac{\alpha H}{W} \int_{a_1}^a \frac{da}{a}$$

$$= \frac{\alpha H}{W} \cdot \ln \frac{a}{a_1} \quad (8)$$

que es el tiempo necesario para que el frente pase de l_1 a l .

Para determinar la edad del agua a una altura h de el piso del acuífero (profundidad $H-h$) en el punto l , se considera que la línea de flujo comienza en la superficie en l_1 ($h_1 = H$) y que pasa a través de ese punto.

La recarga W a aportada encima de l , debe pasar a través de la superficie S , tal que: $W \cdot a = c = v \cdot S$, mientras que la recarga $W \cdot a_1$ tomada por encima de l_1 pasa a través de la superficie $h/H \cdot S$ tal que:

$$W \cdot a_1 = v \frac{h}{H} \cdot S$$

Por ello

$$a/a_1 = H/h$$

y reemplazando en (8)

$$t = \frac{\alpha H}{W} \ln \frac{H}{h} \quad (9)$$

La ecuación (9) da la edad del agua en el punto (l_1, h). La edad se incrementa logarítmicamente con la profundidad.

La edad característica a profundidad $l/2$

$$t_{1/2} = \frac{\alpha H}{W} \ln 2 =$$

y la edad promedio

$$\bar{t} = \frac{\alpha H}{W}$$

En conclusión diremos que si la edad del agua a una profundidad ($H-h$) es conocida, podemos calcular la recarga total a una distancia l de la divisoria de aguas por:

$$W \cdot a = \frac{\alpha H a}{t} \ln \frac{H}{h} \quad (10)$$

La aplicación de estas ideas fué llevada a cabo en un es-

tudio realizado en la isla Schiermonnikoog de Holanda, se ejemplifica en la Fig. 9. Las dimensiones del acuífero están bien definidas y la única fuente de recarga es la precipitación. Las fuentes se tomaron a distintas profundidades para demostrar la estratificación de edades. El pozo mas alejado del mar (Fig. 10) Sch 22 da una buena idea de la forma en que decrece el contenido de ^{14}C con la profundidad y un incremento de la edad aparente, aproximadamente en forma logarítmica. La edad a profundidad $1/2$ es alrededor de 180 años. En el Sch 13 la estratificación no es tan nctoria, pero en general se ve el incremento de la edad con la profundidad. La recarga se calcula de la ecuación (10) asumiendo una porosidad de 0,4

$$W = 0,69 \frac{\alpha H}{t \ 1/2}$$
$$= 0,69 \frac{0,4 \times 65}{180} = 0,1 \text{ m/año}$$

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Vogel, J. C., and Ehalt D. "The uses of carbon isotopes in groundwaters studies", Radioisotopes in Hydrology, IAEA Vienna (1963) 383.
- 2.- Minnich K. O. and W. Roether, "A comparison of ^{14}C and Tritium ages of groundwater" Radioisotopes in Hydrology, IAEA Vienna (1963) 397.
- 3.- Broecker, W. S. and E. A. Olsen, 1960, Radiocarbon from nuclear tests, II: Science, v.132, 712-721.
- 4.- DeVries H₁ and G. W. Barendsen, 1952, A new technique for the measurement of age by radiocarbon: Physica, v 18, pág. 652.
- 5.- DeVries H₁.1958 a, Atomic bomb effect: variation of radiocarbon in plants, shells, and snails in the past 4 years: Science, v 128, p. 250.
- 6.- Hanshaw, B. B., and Meyer Rubin, 1965, Radiocarbon determinations for estimating ground water flow velocities in central Florida: Science, v 148 p. 494.
- 7.- Suess H.E. Secular variations of the cosmic-ray produced Carbon 14 in the atmosphere and their interpretations: J. Geophys. Res. v. 70 p. 5937.
- 8.- Olsson I. U. Modern aspects of radiocarbon datings. Earth Sci. Rev., 4 (1963) 205-218.
- 9.- Wendt I. et al. Model Experiments for ^{14}C Water-Age Determinations. Isotopes in Hydrology IAEA Vienna 1967 p.321.
- 10.- Vogel J. C. Investigation of Groundwater flow with radiocarbon. Isotopes in Hydrology, IAEA Vienna 1967 p.355.
- 11.- Pearson F. J. and White D. E. 1967, Carbon ages and flow rates of water in Carrizo Sand, Atascosa County, Texas: Water Resources Res., v 3, p. 251-261.
- 12.- Pearson F. J. and B. B. Hanshaw, Sources of Dissolved carbonate species in ground water and their effects on Carbon 14 Dating, IAEA. Symposium on the Use of Isotopes in Hydrology, Vienna, 9 - 13 March 1970.-

TRITIO

Generalidades

En 1946 Libby postuló la producción de ^{14}C y Tritio por las interacciones de los rayos cósmicos con los constituyentes de la alta atmósfera y por fin aclaró el comportamiento del Tritio en la naturaleza, si bien las investigaciones se habían iniciado en los años 30. El Tritio natural finalmente fué detectado en el agua en 1951, como consecuencia de las investigaciones de von Grosse, Johnston, Wolfgang y Libby, usando para ello concentraciones electrolíticas y conteo en fase gaseosa.

Desde hace mucho tiempo los investigadores han convenido en expresar los niveles de Tritio natural utilizando una unidad de concentración, esta es llamada Unidad Tritio. Una U.T. equivale a un átomo de Tritio en 10^{18} átomos de H. Se ha determinado además que 1 U.T. equivale a 7,2 dpm por litro de agua.

Luego de aclarar la forma de expresión de las concentraciones naturales diremos que la importancia del tritio en los estudios hidrológicos reside en que como se dijera, formado por interacciones cósmicas (acción de neutrones sobre el N) y posterior oxidación constituye parte de la molécula de agua que por precipitaciones entran a jugar parte en el ciclo hidrológico. El marcado de aguas naturales con Tritio, claramente abrió la posibilidad de estudiar el ciclo hidrológico sobre los continentes y los océanos y por supuesto llegar a determinar características de aguas subterráneas por datación, así como un mejor entendimiento de los mecanismos de recarga.

Los primeros valores informados por los investigadores son del orden de 17 a 42 U.T. para las lluvias de Otawa en los períodos 1951-1953; 7,8 de promedio para las lluvias durante el año 1953 y 0,2 a 1,6 para muestras de agua de mar. Estos valores son de mucha importancia, pues son los niveles menores que se conocen y fueron inclusive usados por los investigadores europeos, quienes comenzaron a establecer estaciones de muestreo, recién a partir de 1961.

Con el advenimiento de las explosiones nucleares, iniciadas con las de New Castle en 1954, se incrementó notablemente los niveles naturales de Tritio en el Hemisferio Norte. Durante el año 1963 se llegaron a detectar hasta 10.000 unidades T en aguas de lluvia. Por supuesto es dado creer que se produjo cierto incremento para el Hemisferio Sur también.

Claro que lamentablemente nosotros actualmente no podemos saber con exactitud cuales son los niveles naturales, pues los únicos datos que se disponen son de algunas mediciones realizadas de muestras tomadas no sistemáticamente de la Antártida (arrojaron valores de 25 a 50 U.T.), de algunas mediciones realizadas en Nueva Zelanda, con valores similares y de las experiencias que nosotros realizamos en el Museo de La Plata (desde cierto punto de vista negativas, pues aún concentrando

electrolíticamente, fué imposible medir gran parte de nuestras muestras con espectrómetro de centelleo líquido) llegando a terminar en forma aproximada que en nuestro país (Prov. de B. As.) no se alcanzaba a 100 U.T. Ver Fig. 1, 2 y 3.

La aplicación de los análisis de Tritio, como dijéramos, desde los primeros momentos sirvió como elemento fundamental en los estudios meteorológicos e hidrológicos, y si bien el Tritio que es introducido artificialmente en el Ciclo, por los ensayos nucleares complica las condiciones de trabajo por la variación de los niveles naturales, también es cierto que los "llamados "bomb tritium pulses" han facilitado otros estudios, como por ejemplo el control de los mecanismos de recarga, fundamentalmente porque las altas concentraciones permiten que las mediciones se realicen mas fácilmente.

A esta introducción agregaré, de la experiencia recogida, que si pretendemos medir en nuestro país las aguas naturales (superficiales y subterráneas) con espectrómetro de centelleo líquido, deberán ser previamente concentradas en mas de 10 veces. Pero este inconveniente podría obviarse, si tuvieramos equipos para realizar las operaciones en fase gaseosa, pues en algunos laboratorios han llegado a medir a partir de 5 U.T. con lo cual se facilitarían las cosas, pues en principio solo tendríamos que concentrar las muestras de aguas subterráneas.

Es importante hacer notar que hasta aquí hemos estado hablando de niveles de Tritio naturales para distintos tipos de aguas, pero cabe agregar que el Tritio producido artificialmente en los laboratorios, conocido como "agua tritiada", es uno de los trazadores radiactivos mas usado por los especialistas para solución de problemas hidrológicos, pues reviste condiciones muy especiales tales como: es un componente natural de la molécula del agua y fundamentalmente es el trazador con menos problemas de absorción y adsorción por los sedimentos, ya sean del lecho de un río o de los constituyentes del acuífero. En estos casos, como en general se usan altas actividades, no son necesarios los procesos de concentración, y las mediciones son fácilmente realizadas. La dificultad estriba en que las muestras deben ser enviadas a los laboratorios para sus posteriores mediciones.-

Técnicas de Muestreo:

He creído conveniente desarrollar este tema, pues el encargado de tomar las muestras debe tomar en consideración algunos elementos para que, los ulteriores análisis en los laboratorios arrojen resultados coherentes.

Lógicamente que el sistema de muestreo y la cantidad de agua a recoger, dependerá del tipo de muestra a analizar y de los elementos de medición con que se cuente. Pero lo que debe quedar claro es que, elegida un área de estudio, deberá ser:

zarse un muestreo sistemático, tomando muestras de agua de lluvia, aguas superficiales (ríos, lagunas, lagos etc,) y de las aguas subterráneas.

Para el muestreo de agua de lluvia conviene elegir, si se dispone de ello, una estación meteorológica, en la que las muestras se recojerán en pluviómetros comunes, anotando los mm de lluvia caídos en el día, los que deben ser luego transvasados a un recipiente de vidrio que deberá cerrarse muy bien. Esto deberá hacerse con las sucesivas muestras de un mes, Pues lo que ha de analizarse en el laboratorio será la mezcla de agua de las distintas lluvias de un mes. Conviene que al laboratorio lleguen alrededor de 2 litros de agua, pero por supuesto, que según la zona tendremos que contentarnos con lo que se pueda recojer. Las muestras deberán enviarse a los laboratorios preferentemente en botellas de vidrio y si por razones de distancia entre el lugar de muestreo y el laboratorio pudiera existir peligro de que éstas se rompieran, podrán enviarse en botellas de plástico, pero al llegar a destino deberán pasarse de inmediato a recipientes de vidrio. Lo mismo debe hacerse si se pretende almacenar. Esto que he enfatizado se debe a que se ha comprobado que se puede producir contaminación por difusión del Tritio atmosférico a través del plástico.

Para el muestreo de aguas superficiales y subterráneas, conviene también tomar unos dos litros y tal cual se dijera antes, si se usaran recipientes de plástico por razones de seguridad de la muestra, inmediatamente llegue al lugar de destino deberá transvasarse a recipientes de vidrio.

Si se toma la cantidad de muestra aconsejada y los recaudos planteados, no solamente la muestra así recojida servirá para los futuros análisis de Tritio, sino que también podrán aprovecharse estas aguas para el estudio de isótopos estables (D , ^{18}O y ^{13}C)

Aplicaciones

Una vez que se tuvo idea que los llamados "environmental isotopes" eran factibles de ser transportados a través de la atmósfera y de la migración de los mismos en las fases terrestres del ciclo hidrológico, se tuvo perfecta noción del aporte que implicaba el estudio de estos isótopos para la solución de problemas en Hidrología, Meteorología y Oceanografía. Por ello a partir de 1961 la Agencia Internacional de Energía Atómica, conjuntamente con la Organización Meteorológica Internacional, establecieron a través de todo el mundo, estaciones de muestreo de aguas de lluvia para análisis de Tritio y de isótopos estables, pero dando fundamental importancia al servicio para el estudio de niveles naturales de Tritio. Las muestras que se han tomado fueron remitidas a los laboratorios de la Agencia y a otros que están en permanente contacto con ella. Así fue como pudo llegarse a una serie de conclusiones muy interesantes,

en particular establecidas para el Hemisferio Norte, ya que como lo manifestara anteriormente, muy pocos son los datos que se tienen del Hemisferio Sur. Entre otras consideraciones se estableció:

- a) Las concentraciones pico del Tritio ocurren en las partes finales de la primavera y verano.
- b) La máxima concentración anual de Tritio fue observada en 1963. Al menos esto es cierto para el Hemisferio Norte.
- c) Existe el llamado fenómeno de latitud. Las máximas concentraciones en el Hemisferio Norte se encuentran a los 50°. En el Hemisferio Sur este fenómeno parece ser menos pronunciado.
- d) Que se han encontrado efectos marcados de altitud. Fenómenos marcados en la India. Además los investigadores del Instituto de Ciencias Nucleares de Nueva Zelandia, analizando nieves a 2000 metros de altura observaron 40 U.T. mas que en las zonas a nivel del mar.
- e) Que en las estaciones continentales siempre se encuentran niveles de concentración de Tritio mayores que los de las estaciones marinas. En general esto se atribuye a una dilución de las precipitaciones con alto contenido de Tritio, por el relativo vapor de agua inerte de los océanos. Sin embargo los meteorólogos están estudiando muy bien estos efectos, porque los procesos serían mas complicados.

Con respecto al Hemisferio Sur podemos decir que a pesar de los pocos datos que han podido evaluarse, algunas conclusiones se han establecido, así:

- a) Como ya lo manifestara las concentraciones de Tritio son mucho mas bajas en lluvias y ya sea para las estaciones continentales como para aquellas cercanas al mar, los valores obtenidos son del orden de las 30 U.T.
- b) A diferencia del Hemisferio Norte, los picos aparecen al comienzo de la primavera.
- c) Las mayores concentraciones no solo aparecieron en 1963 sino que también se hicieron extensivas a 1964.
- d) En este Hemisferio aparecen "típicas" estaciones continentales con un pico relativo en primavera.

Teniendo en cuenta que para el Hemisferio Sur hay espacios muy grandes que han quedado en blanco con respecto a muestreo y ulterior control de los niveles de Tritio, los especialistas han utilizado los datos obtenidos de Estroncio 90 para llenarlos. Esta técnica se basó asumiendo que, el Tritio y el Estroncio 90 son transportados por mecanismos estratosféricos idénticos en el Hemisferio Sur y que los fenómenos como reevaporación no son significativos. Para calcular la relación de Tritio a Estroncio 90, se fue obteniendo las deposiciones

mensuales de ambos isótopos para un sitio dado, y se dividió por el total de precipitación caída en los meses en juego. Esto da un promedio de deposición por Km^2 por cm de precipitación. El período elegido fue los 9 últimos meses de 1963 (se evitó así alguna posible contaminación por las explosiones de Rusia en Diciembre de 1962). Además debe aclararse que no hicieron correcciones por evaporación en cuanto a Tritio se refiere. El ploteo realizado puede verse en la Fig. 4.

A fin de entender mejor lo que hasta ahora se ha planteado, veremos un caso práctico que ha sido estudiado por los Doctores L. Thatcher y E. Payne, sobre el efecto causado en un ciclo geológico anual del Tritio caído en las precipitaciones y el funcionamiento de Tritio en los procesos de recarga a las aguas subterráneas. Ellos establecieron un modelo (Fig.5) el cual es una adaptación de un gráfico de precipitación y evaporación de Thornwaite, para un área cercana a Washington D. C. Se supone una recarga hipotética y se enfrentan los valores caídos en Tritio frente a las curvas de precipitación y de evapotranspiración para el área en 1963.

El gráfico comienza a principios de octubre cuando la precipitación y la evapotranspiración son normalmente iguales. Esta época es el fin de la estación de crecimiento activo de las plantas y hay deficiencia de agua en el suelo; la freática está al mínimo, la precipitación se infiltra en el suelo seco como se ve en el área A; cuando ha finalizado la demanda de agua por el suelo, la precipitación adicional puede ser usada para recargar las aguas subterráneas, como se ve en el área B, comenzando en Diciembre.

Las posibilidades de recarga continúan hasta marzo, produciéndose además escurrimiento superficial. Como vemos el aporte de agua al suelo y a las aguas subterráneas está limitado desde octubre hasta marzo. El diagrama muestra entonces que la recarga al acuífero se produce desde diciembre hasta marzo, lo cual podría hacer suponer de primera intención que la concentración de Tritio en el proceso de recarga es la misma que la de la precipitación en ese período de tres meses. Sin embargo esto es incorrecto, pues se produce una mezcla parcial con la humedad tomada de la fase A y la recarga tiene una concentración de Tritio compuesta de una mezcla de A mas B mas un pequeño componente de aguas retenidas de otra época del año y aún de años previos, particularmente si la zona insaturada es profunda. La mezcla obviamente dependerá fundamentalmente de la porosidad capilar del sistema. La mezcla sería incompleta de tal manera que el agregado de precipitación anual se ubicaría en mantos en el suelo y en las posiciones respectivas de los mantos serían retenidos durante los procesos de percolación.

Lo mas importante que puede deducirse de esto es que la descarga se produce fundamentalmente durante el período del año con menor concentración de Tritio. De esto también se deduce que la concentración del Tritio en el agua subterránea debe ser

menor que la concentración en el promedio de precipitación anual. Normalmente desde Mayo hasta Setiembre, la evaporación excede la precipitación y muy poco Tritio entra entonces en el sistema. Por lo tanto, como puede verse en el histograma, la máxima en Tritio durante el año 1963 se pierde por evaporación.

Algunos factores podrían afectar la concentración del Tritio en la recarga, por ej.:

- 1.- El modelo anual de ciclo de precipitación: Variaciones del ciclo expuesto harían variar indudablemente las concentraciones medias de la entrada de Tritio proveyendo agua al suelo o al acuífero concentraciones distintas de las mencionadas, es decir podría desplazarse el sistema.
- 2.- Temperatura: En el modelo expuesto no consideramos la posibilidad de suelos helados, pues en estos casos veríamos minimizada la infiltración en invierno y el efecto sería un desplazamiento del área B a la derecha justo en la región de alta concentración de Tritio. También puede asegurarse, que temperaturas mas frías incrementarían la recarga de Tritio.
- 3.- Vegetación:
 - a) Si no existe vegetación por supuesto no hay transpiración, por lo tanto las pérdidas serán solo por evaporación y aparentemente el área será mas chica, y de esta manera es muy posible la recarga de Tritio y justamente en el pico. Debe agregarse además que en el caso de recarga directa como en el caso de basaltos diaclasados, la recarga de Tritio puede ser muy parecida a la concentración de Tritio en la precipitación.
 - b) Zonas con pastos. En estos casos la evapotranspiración es modesta y la zona de raíces es superficial. Las fuertes lluvias pueden hacer infiltrar parte del agua mas allá de la zona de raíces aún en verano y esto elevaría el contenido en Tritio del agua del suelo.
 - c) Zonas con plantaciones: Aquí la evapotranspiración se produce al máximo y solo puede esperarse que el Tritio se acumule solamente en el época latente para una eventual recarga. Por lo tanto en estecaso la recarga en Tritio manifiesta al mínimo anual.

Pasaré a considerar ahora otra de las posibles aplicaciones del Tritio, siguiendo el esquema propuesto por Münnich, Roether y Thilo. Los autores consideraron en este modelo la datación de aguas subterráneas poco profundas, sobre la base del contenido en Tritio, si el suelo insaturado y el mismo acuífero son insuficientemente homogéneos. Establecieron además que la percolación en el suelo no saturado y el acuífero saturado es un proceso de estratificación.

La seguridad de la datación dependerá del conocimiento que se tenga en la concentración del Tritio en el escurrimien-

to anual del agua, de la situación hidrológica individual y de la técnica de muestreo aplicada.

En la Fig. 6 puede verse la variación en el contenido de Tritio en las lluvias desde el 53 al 66. Puede observarse además el promedio anual y los promedios de Setiembre a Marzo, Octubre a Diciembre de cada año. Por la evapotranspiración la mayor parte de la alta concentración de Tritio de las aguas de lluvia del verano, no son utilizadas en la recarga. Como fuera planteado, la concentración de Tritio de la recarga anual corresponde mayormente a la precipitación promedio de Setiembre a Marzo, mientras que de Octubre a Diciembre se representa el lapso de mínima concentración de Tritio en lluvia.

Si se calcula el incremento total de Tritio M en un cuerpo de agua, durante un intervalo de tiempo entre t_1 y t_2 , se obtiene:

$$M = \int_{t_1}^{t_2} A(t) \cdot Rg(t) dt \quad (\text{U.T. x metros})$$

$A(t)$: variación de la concentración de Tritio en la recarga de agua subterránea con el tiempo t .

$Rg(t)$: proporción de la recarga de agua subterránea (m/a)

Si Rg es constante con el tiempo, tendremos que:

$$M = Rg \cdot S$$

donde
$$S = \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \quad (\text{U.T. x años})$$

Ellos llaman a S , aumento específico de Tritio. Rg por supuesto que no es constante con el tiempo, pero se puede aproximar muy bien asumiendo eso. Por ello entonces \bar{Rg} es el promedio anual de la recarga de agua subterránea.

Debemos realizar otro tipo de aproximación, pues por ejemplo en Europa Central la recarga en 1965, fué mayor que en el año 1964 de pocas lluvias. Entonces si uno conoce esta relación de ciertos sitios individuales del área en cuestión, uno puede compensar la variación de tiempo de Rg adoptando una función $A^+(t)$ en $S^+ = \int A^+(t) dt$, manteniendo entonces la relación simple: $M = Rg \cdot S^+$

La primera aproximación para el aumento específico de Tritio es de aproximadamente 3300 U.T. x año (corregido por decaimiento radioactivo) si se usan los valores de Setiembre a Marzo de la Fig. 6 y aproximadamente 5.000 U.T. x año si se usan los promedios de Tritio en lluvia directamente.

El contenido de Tritio de la humedad del suelo y o del agua subterránea ha sido medido en algunos lugares del Valle del Rhinn. La distancia vertical desde la superficie del suelo a la freática es prácticamente constante. Los sedimentos

son arenas medianas a finas.

La Fig. 7, muestra un perfil para un pozo cerca de Frankfurt Main. Las muestras se tomaron aisladamente bloqueando el encamisado por encima y por debajo de la bomba con tubos de goma inflados. El contenido total de Tritio se determinó basándose en que la porosidad es de 0,35, el contenido de agua del suelo insaturado es 10% del volumen, el contenido de Tritio de la humedad del suelo es 500 U.T. (ver Fig. 8). La integración bajo la curva en la Fig. 7, da como resultado un valor de $M = 700 \text{ U.T. x metro}$ para el contenido total de Tritio, 30% a su vez está contenido en el suelo no saturado. Esto da un valor para el promedio de la recarga de agua subterránea de:

$$(700 \text{ U.T. x metro }) / (3300 \text{ U.T. x año }) = 0,21 \text{ m/año}$$

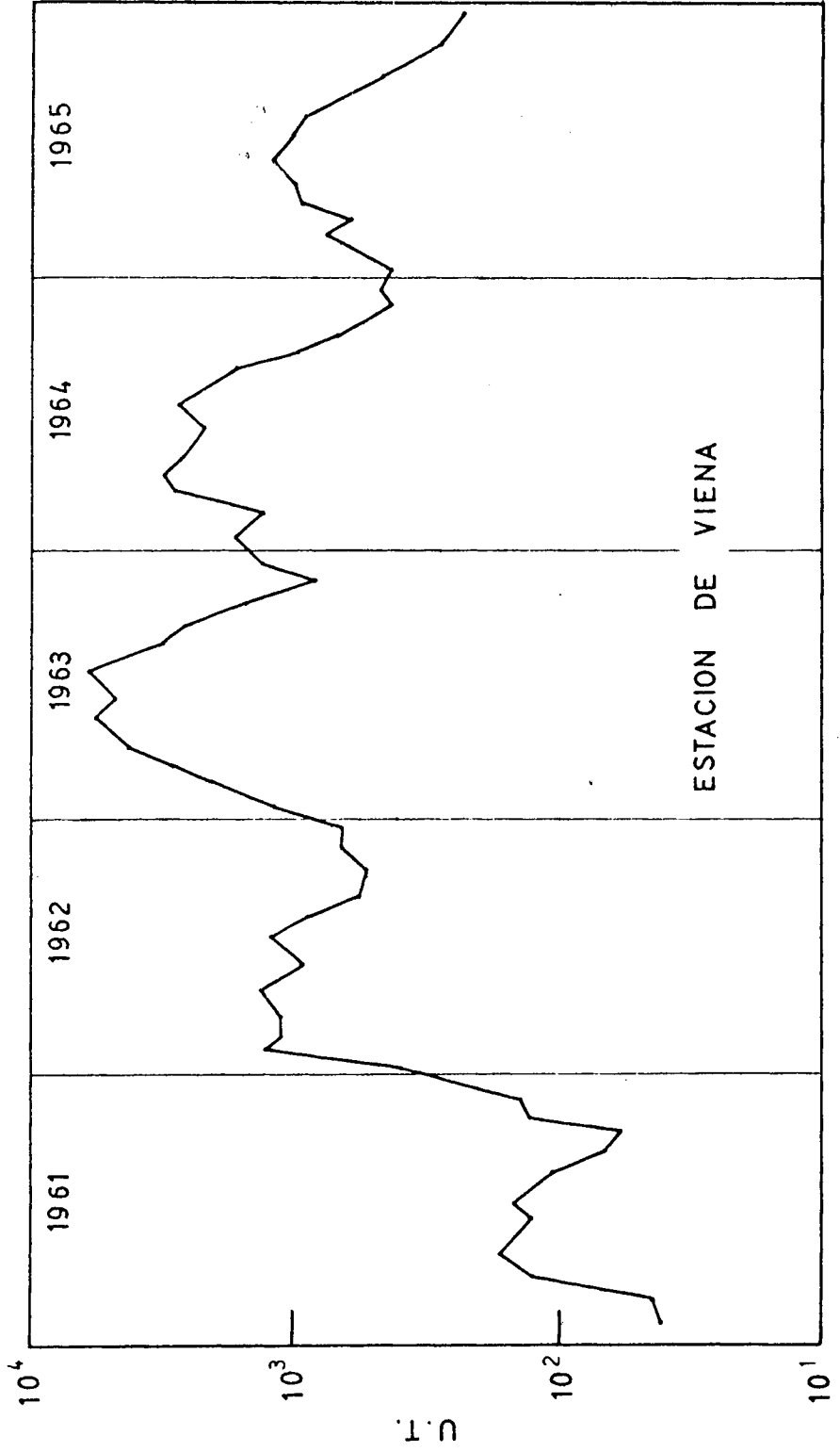
BIBLIOGRAFIA

- 1.- Begemann F. and Libby W. F. (1957). Continental Water Balance, Ground Water Inventory and storage time, surface ocean mixing rates and world-wide water circulation patterns from cosmic ray and bomb tritium. *Greech. et Cosmochim. Acta* 12.
- 2.- Brown R. M. and Grummitt W.E. (1956). The determination of Tritium of natural waters. *Canad. J. Chem.* 34, 220-226.
- 3.- Carlston, C. W. and Thatcher, L. L. Tritium as a Hydrologic tool, *Scientific Hydrology* 52 (1960) 503-512.
- 4.- Münnich, K. O. Roether W., A comparison of ^{14}C and Tritium ages of groundwaters - *Radioisotopes in Hydrology*, IAEA, Vienna (1963) 397
- 5.- Münnich K. O. The Heidelberg present and future programme in Hydrology. Internal Rep of the Section of Hydrology, IAEA, Vienna (1964).
- 6.- Münnich K. O., Roether and Thilo L. Dating of Groundwater With Tritium and ^{14}C - *Isotopes in Hydrology*. IAEA, Vienna 1967.
- 7.- Levin M. Informe sobre el Estudio del Ciclo Geocímico del Tritio en el NE. de la Prov. de Bs. As. y su Aplicación en problemas hidrogeológicos. III Congreso Nacional del Agua. 1968.
- 8.- Thatcher, LL, Payne B. The distribution of Tritium in precipitations over continents and its significance to groundwater dating. - *International ^{14}C and Tritium Dating Conference*, Washington State University, Pullman (7 al 11 june 1965) 604-29.

TABLA I: Análisis de Aguas de las "Oarrizo Sand"

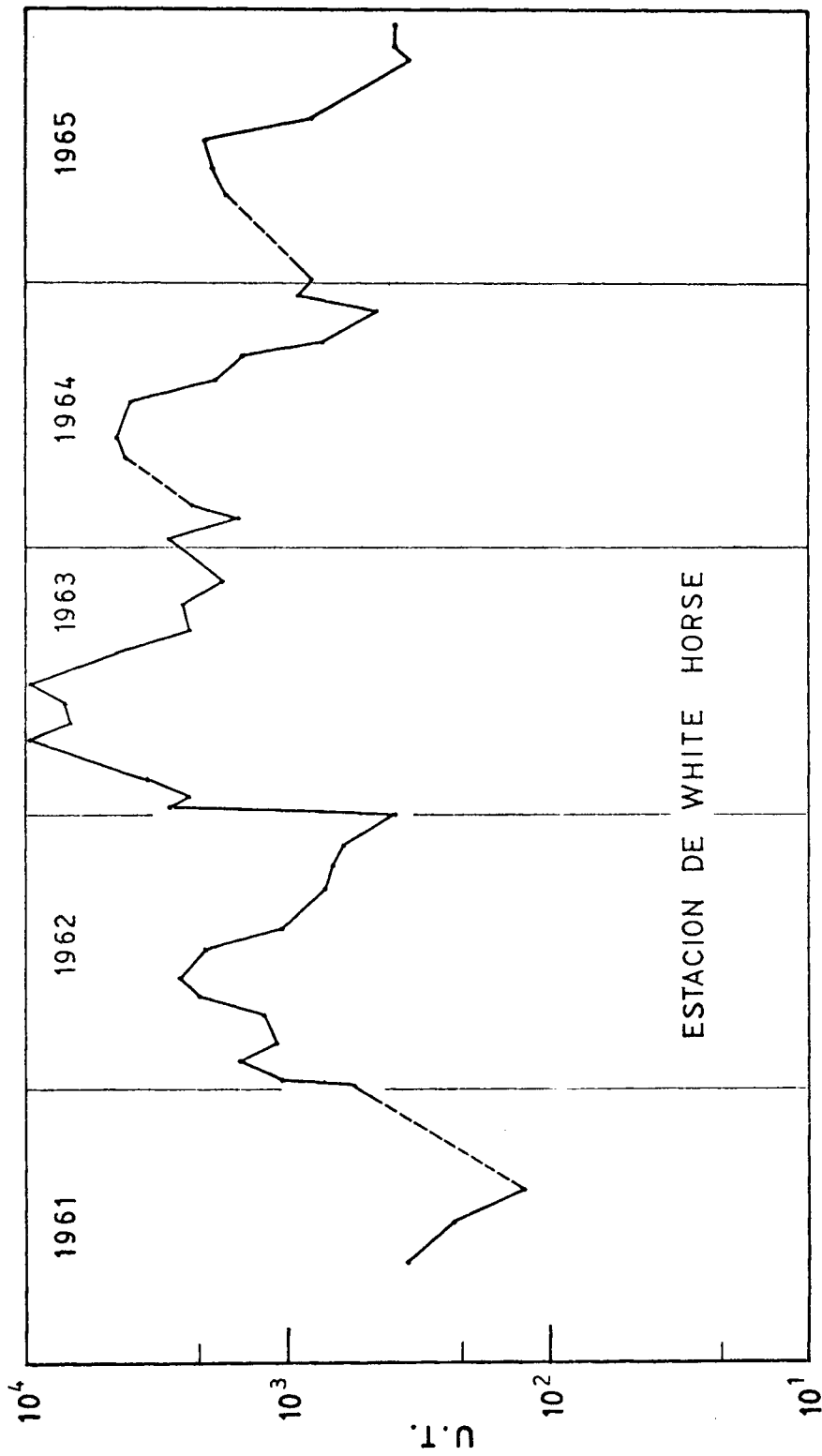
Pozo N	^{14}C Moderns % \pm 2 σ	$\delta^{13}\text{C}$ PDB	Carbonato total epm	P	P'°	Edad de ^{14}C
Tx-90	76.9 \pm 2.0	-18.9	2.82 \pm 0.25	0.756	0.784 \pm 0.082	(98.1 \pm 10.7%)
Tx-92	50.1 " 1.4	-17.9	2.77 " 0.20	0.716	0.798 " 0.072	3.750 " 1150
Tx-91	74.9 " 1.4	-18.5	2.66 " 0.20	0.740	0.831 " 0.076	(90.1 " 8.5%)
Tx-210	33.6 " 0.8	-11.5	5.30 " 0.32	0.460	0.417 " 0.034	1.730 " 670
Tx-93	17.1 " 0.8	-11.8	5.89 " 0.22	0.472	0.375 " 0.025	6.300 " 700
Tx-94	6.92 " 0.82	-9.9	5.62 " 0.14	0.396	0.393 " 0.023	14.000 " 1050
Tx-96	2.54 " 0.40	-15.0	6.31 " 0.16	0.600	0.266 " 0.015	18.900 " 1300
Tx-226	6.38 " 0.50	- 8.8	4.60 " 0.11	0.354	0.480 " 0.028	16.200 " 800
		- 8.9				
Tx-216	3.69 " 0.28	-11.7	4.87 " 0.11	0.468	0.454 " 0.027	20.200 " 770
Tx-214	1.36 " 0.20	- 9.8	9.46 " 0.19	0.392	0.234 " 0.014	22.900 " 1300
Tx-97°	1.19 " 0.34°°°	- 3.7	15.67 " 0.30	0.148	0.141 " 0.008	> 18.000°°°
Tx-215	2.06 " 0.26°°°	- 9.1	6.24 " 0.12	0.364	0.354 " 0.020	> 22.000°°°
Tx-217	1.17 " 0.18	- 9.5	5.73 " 0.11	0.380	0.386 " 0.022	28.200 \pm 1400
Tx-218	< 0.62	-10.7	9.99 " 0.20	0.428	0.221 " 0.013	> 28.200
Tx-219	< 0.66	-10.6	15.48 " 0.34	0.424	0.143 " 0.008	> 24.300

°: usando C inicial = 2,21 \pm 0,12 epm; °°: calculado usando la expresión Edad = 8030 e⁻ (A^e);
 donde A^e = % Mod/100 x P', es decir el contenido de ^{14}C corregido; °°°: Muestras contaminadas durante el muestreo.-



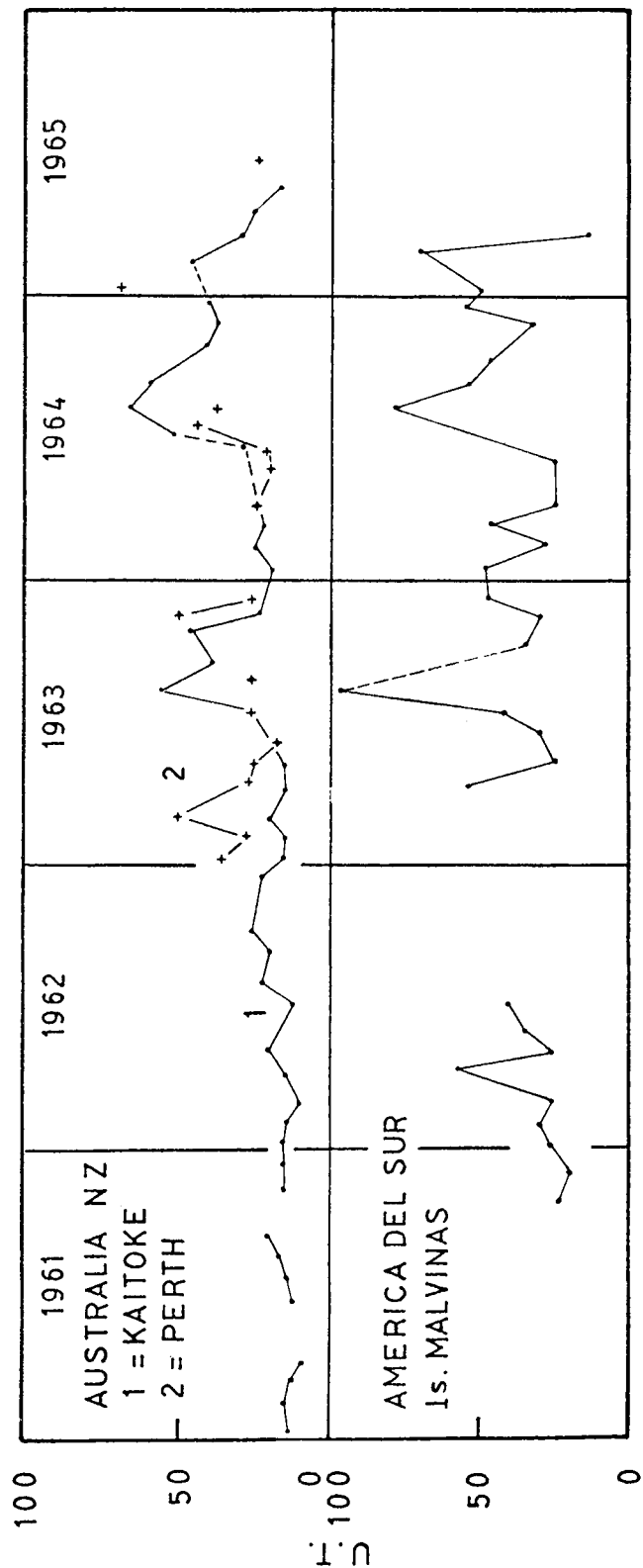
PRECIPITACION DE TRITIO EN EUROPA

Fig. 1



PRECIPITACION DE TRITIO EN NORTE AMERICA

Fig. 2



PRECIPITACION DE TRITIO EN EL HEMIFERIO SUR

Fig.3

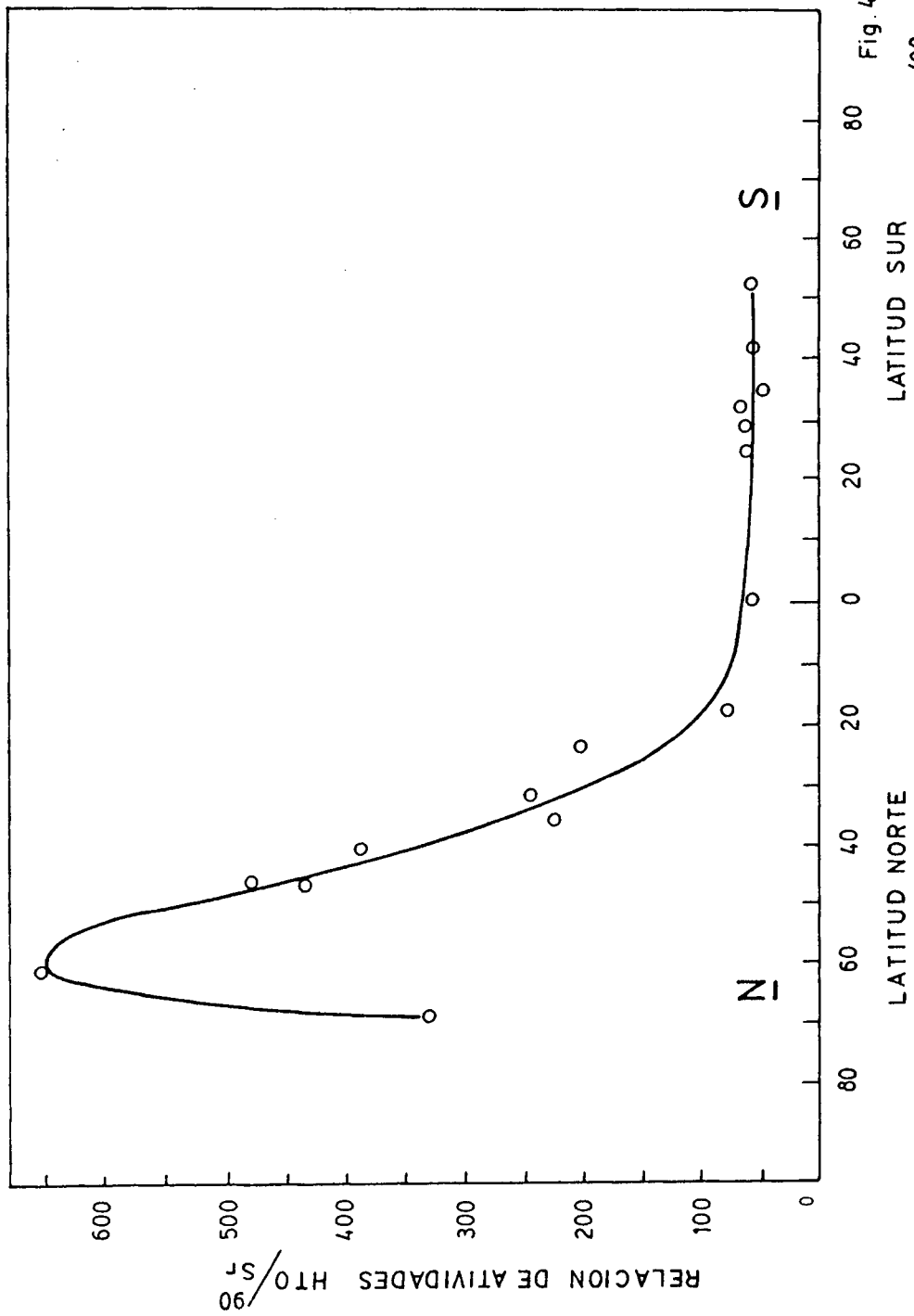


Fig. 4

PLOTEIO DE LA RELACION DE ACTIVIDADES DE HTO/ ^{90}Sr

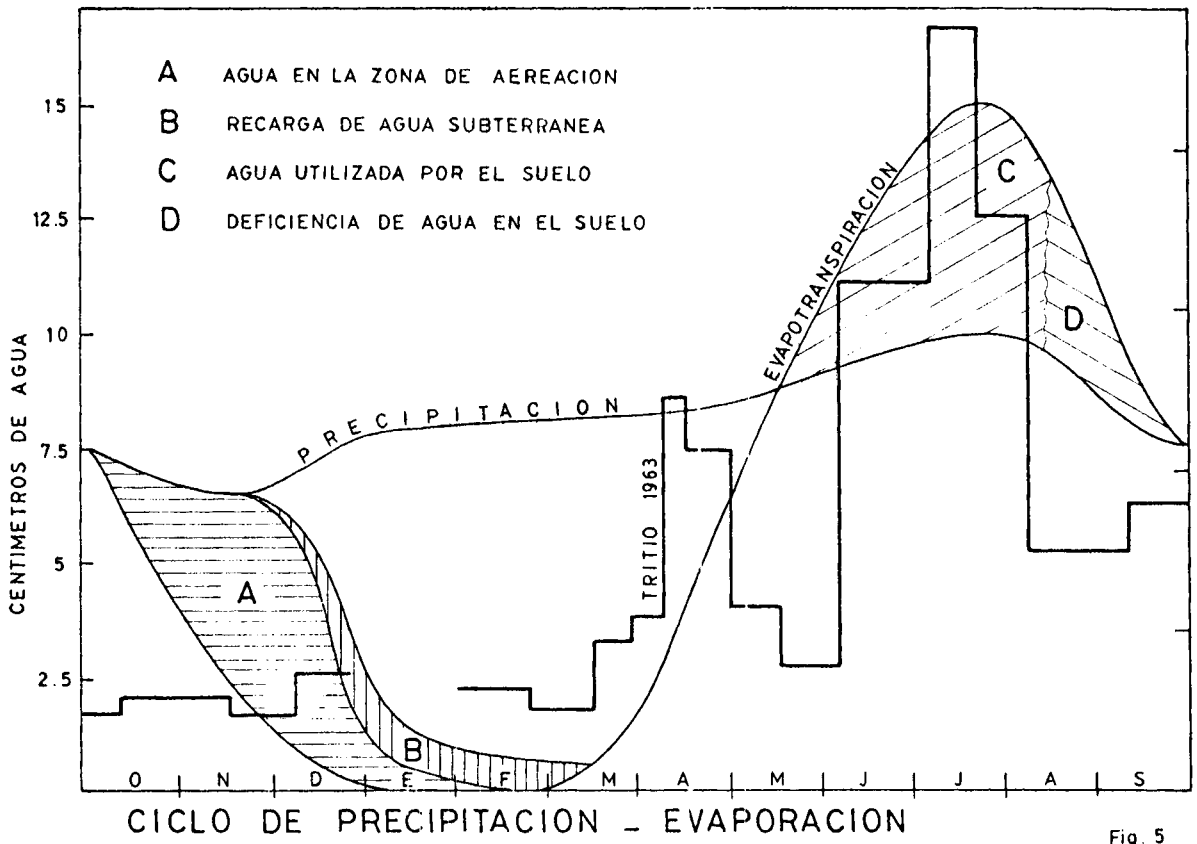


Fig. 5

MÜNNICH et al

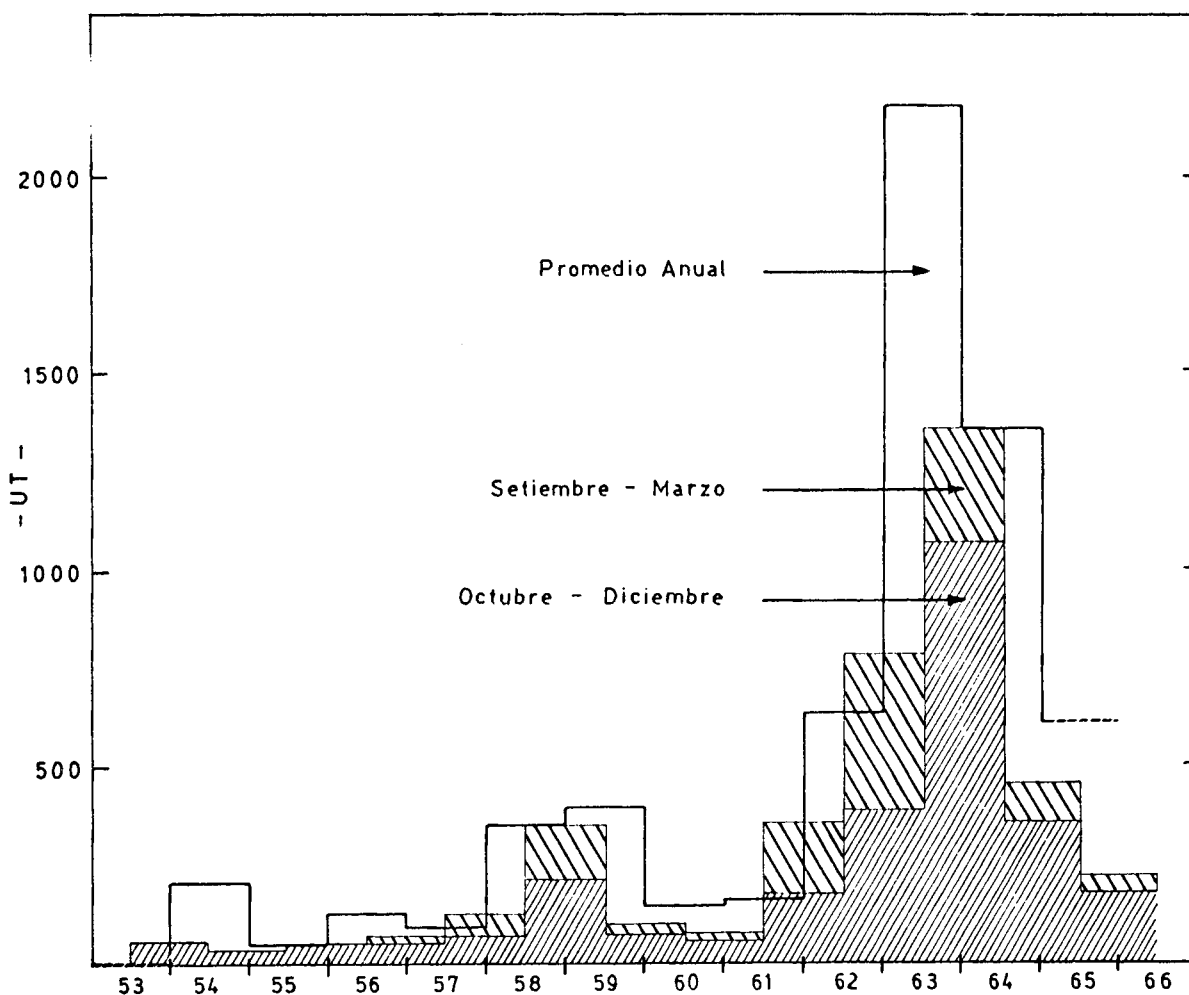
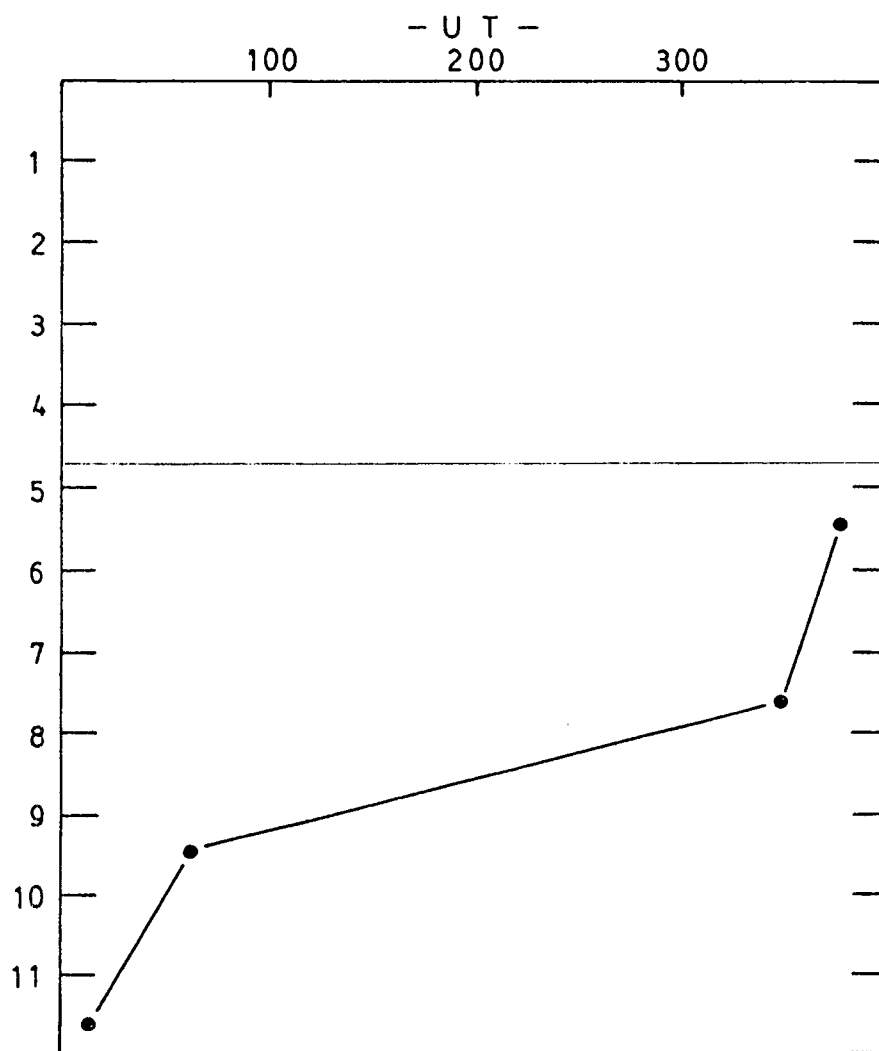


Fig. 6

Promedio de concentración de Tritio en las lluvias para Europa Central
Los datos anteriores a 1958 Son de Otawa.
Los promedios de Otoño - invierno representan la concentración de
Tritio en la recarga de agua Subterránea.

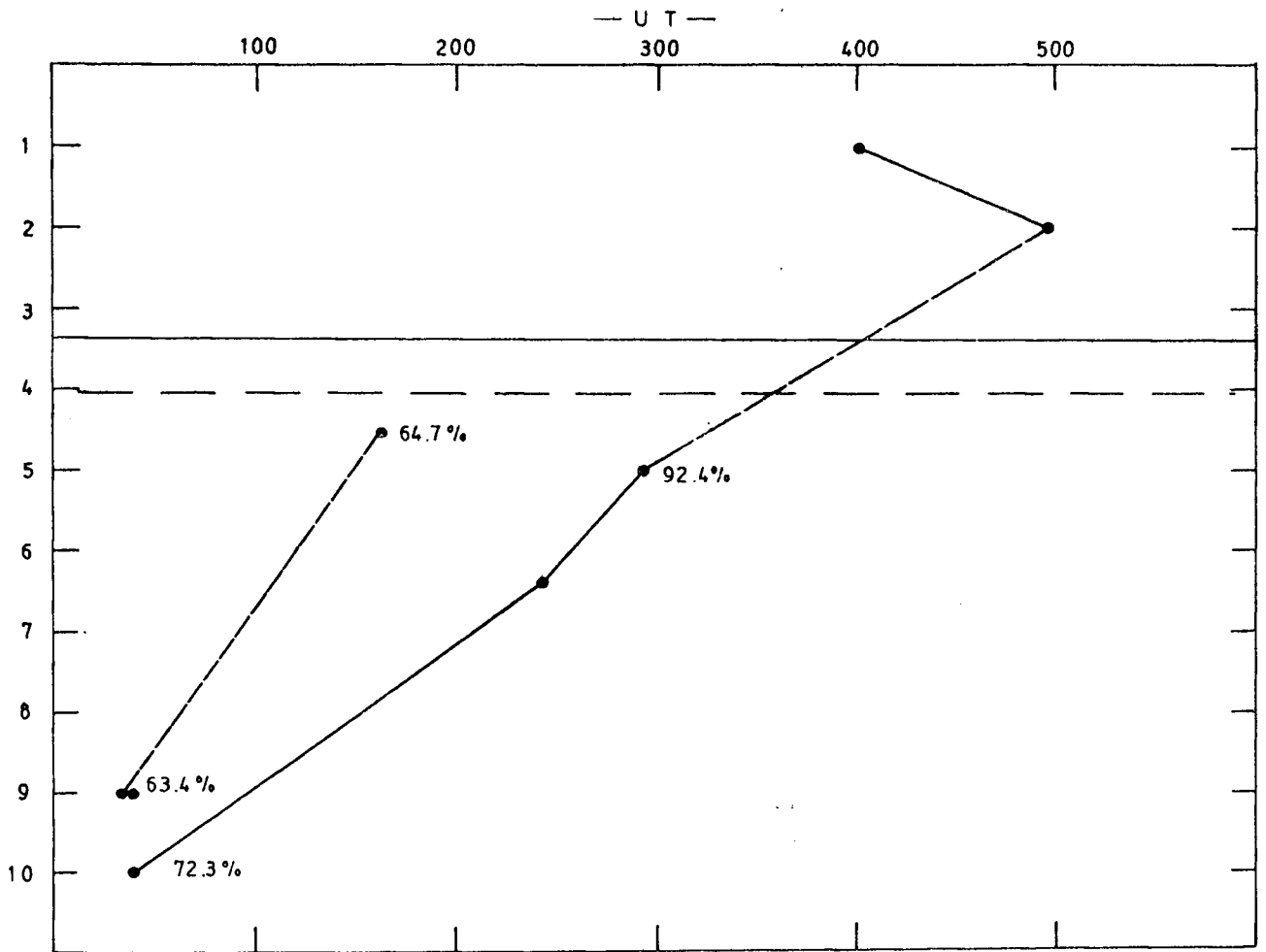
MÜNNICH et al



Concentración de Tritio en un pozo de Frankfurt -
Mainlas concentraciones de C 14 fueron 86,7% y
89,9% (del ácido oxálico estándar) a 10,6 y 7,6 m
respectivamente.

Fig. 7

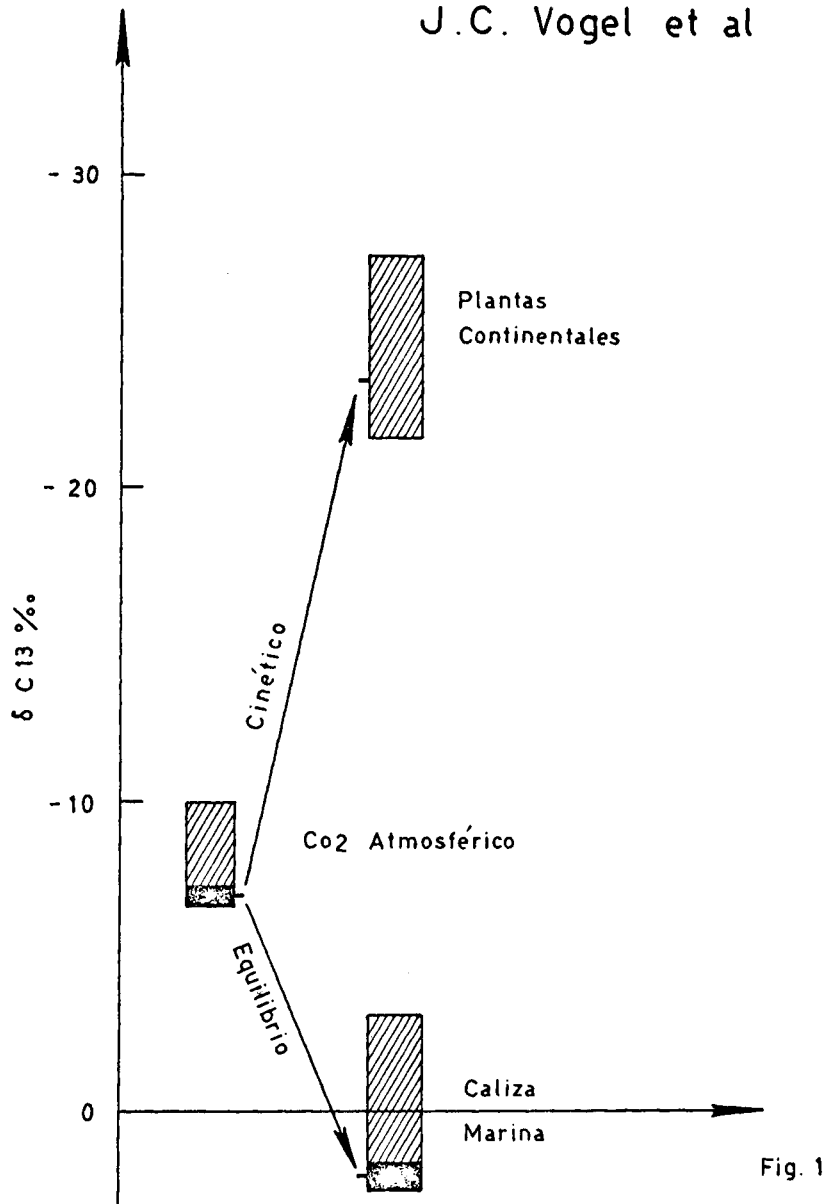
MÜNNICH et al



Actividad de Tritio en agua Subterranea y en la humedad del Suelo arenoso
Curva izquierda - muestra de Julio de 1965
Curva derecha - muestra de Octubre de 1966

Fig. 8

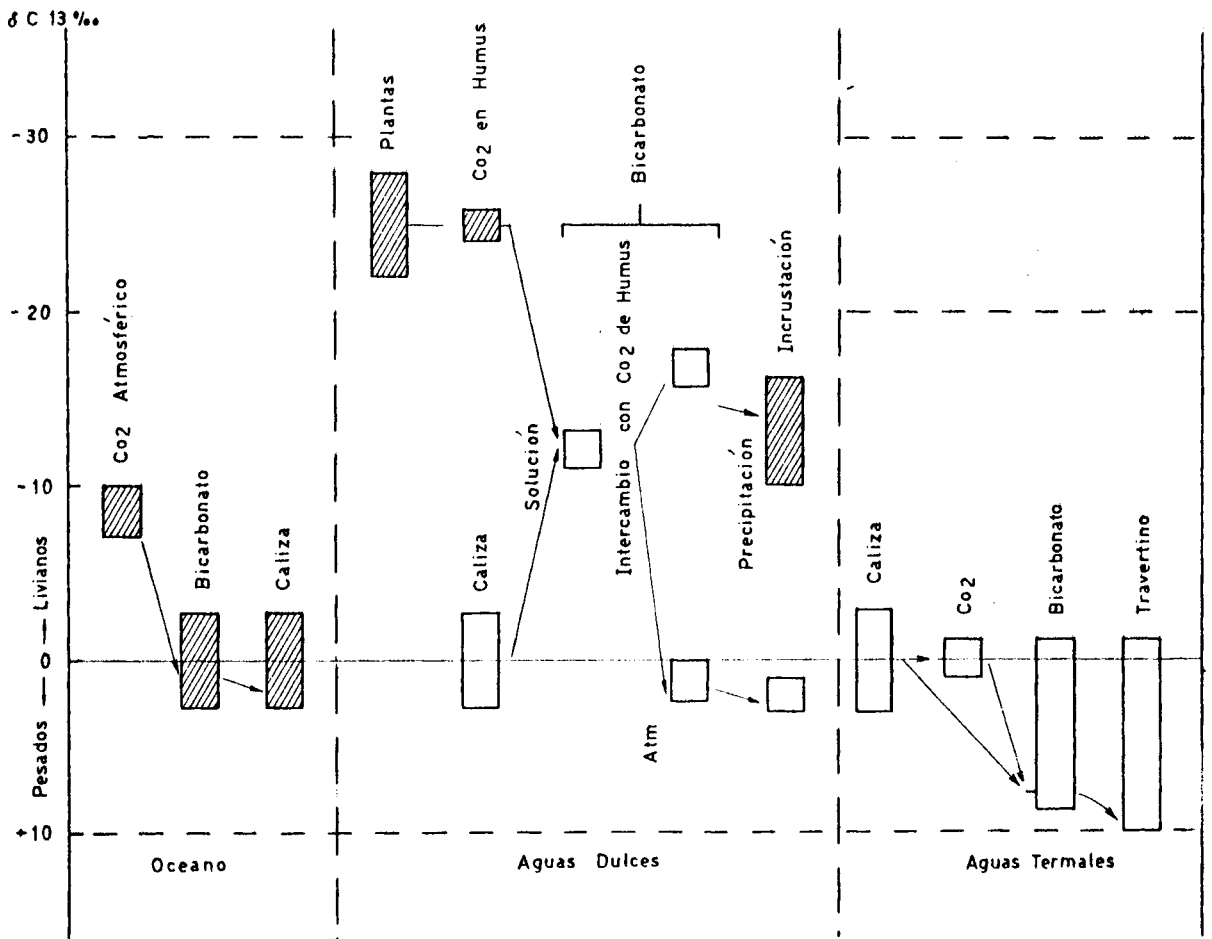
J.C. Vogel et al



Los dos principales efectos de fraccionamiento en la naturaleza

- 1 - Empobrecimiento en C 13 durante la asimilación de Co_2 por las Plantas
- 2 - Enriquecimiento en C 13 en el bicarbonato y las calizas marinas con respecto al Co_2 atmosférico.

J. C. Vogel et al



Relación Isotópica de $C^{13} - C^{12}$ de bicarbonatos disueltos y calizas bajo condiciones naturales diferentes.

Fig. 2

Pearson and White

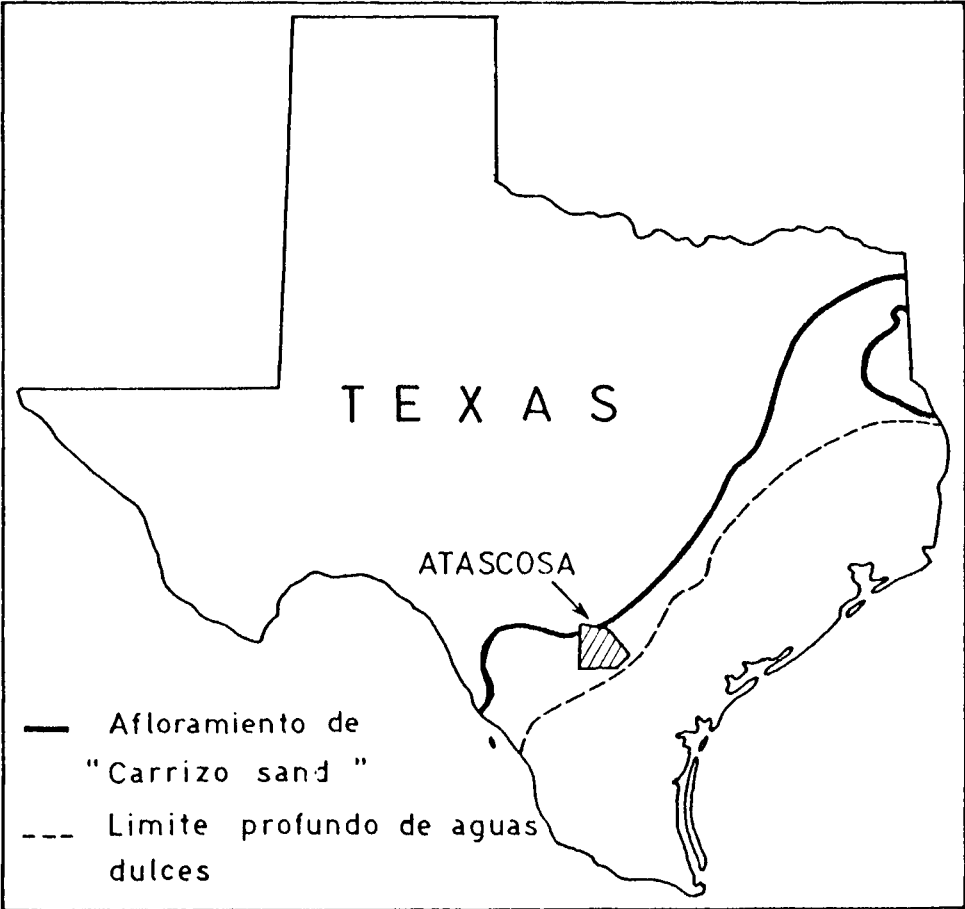


Fig. 3

Pearson and White

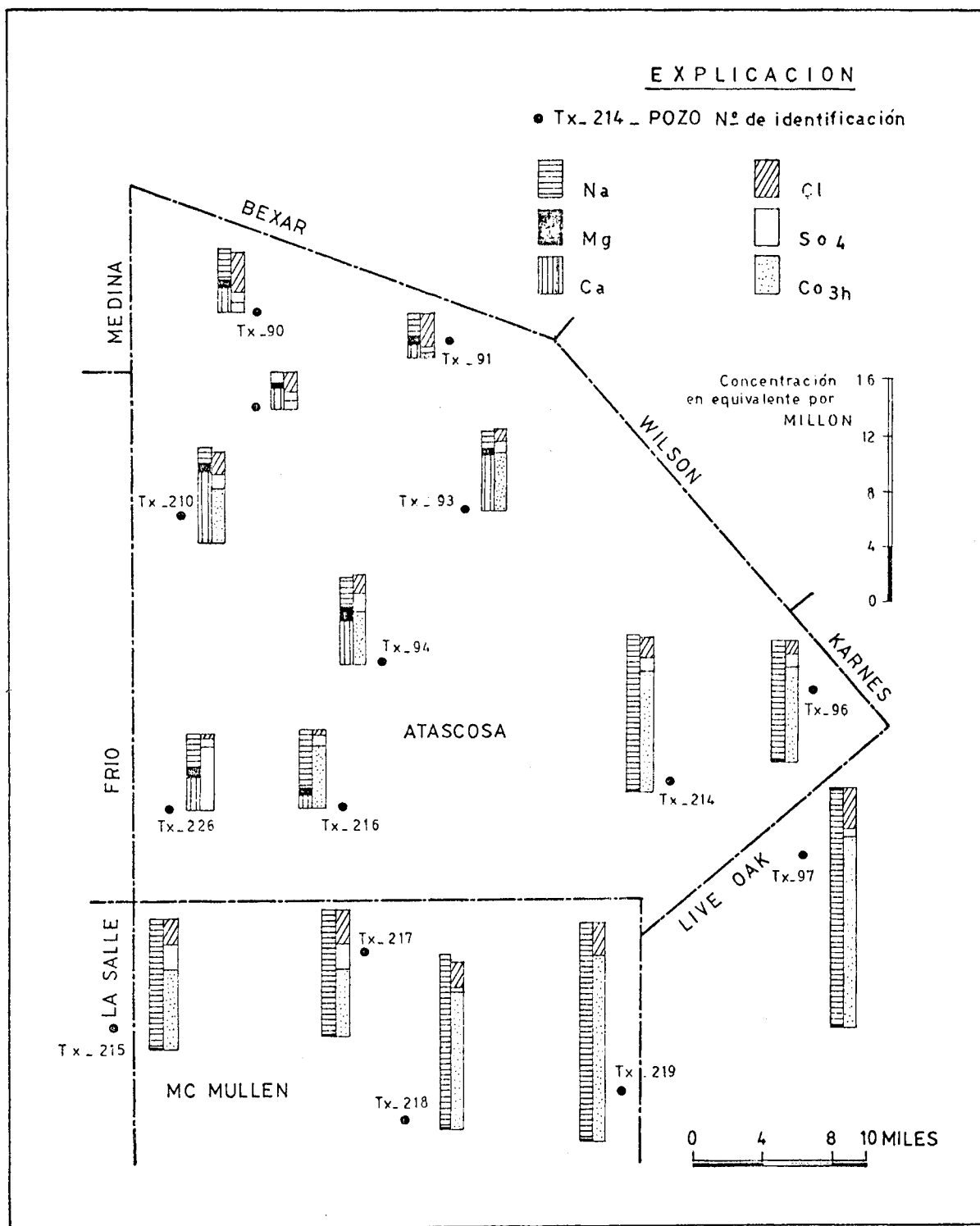


Fig. 4

Pearson and White

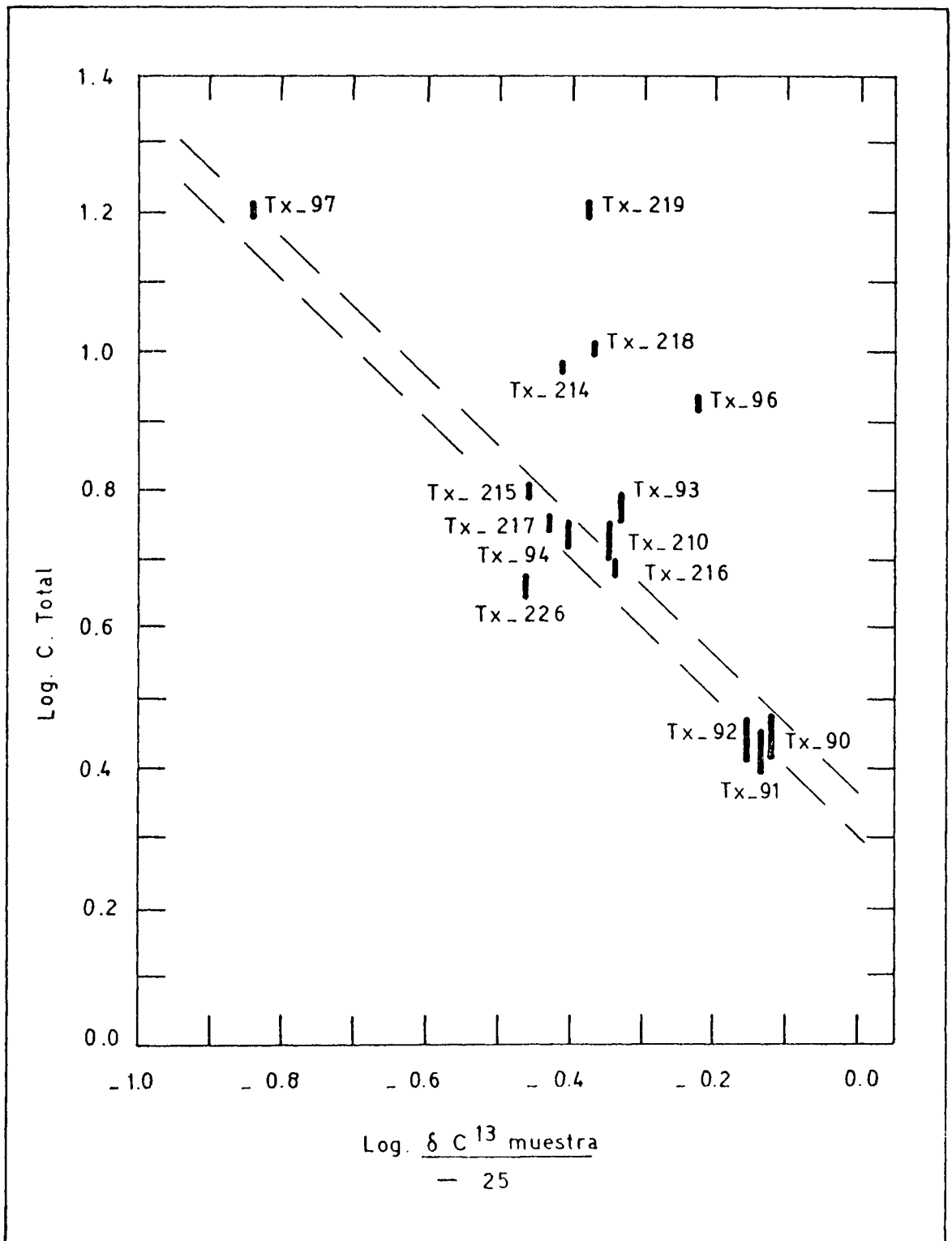


Fig. 5

Pearson and White

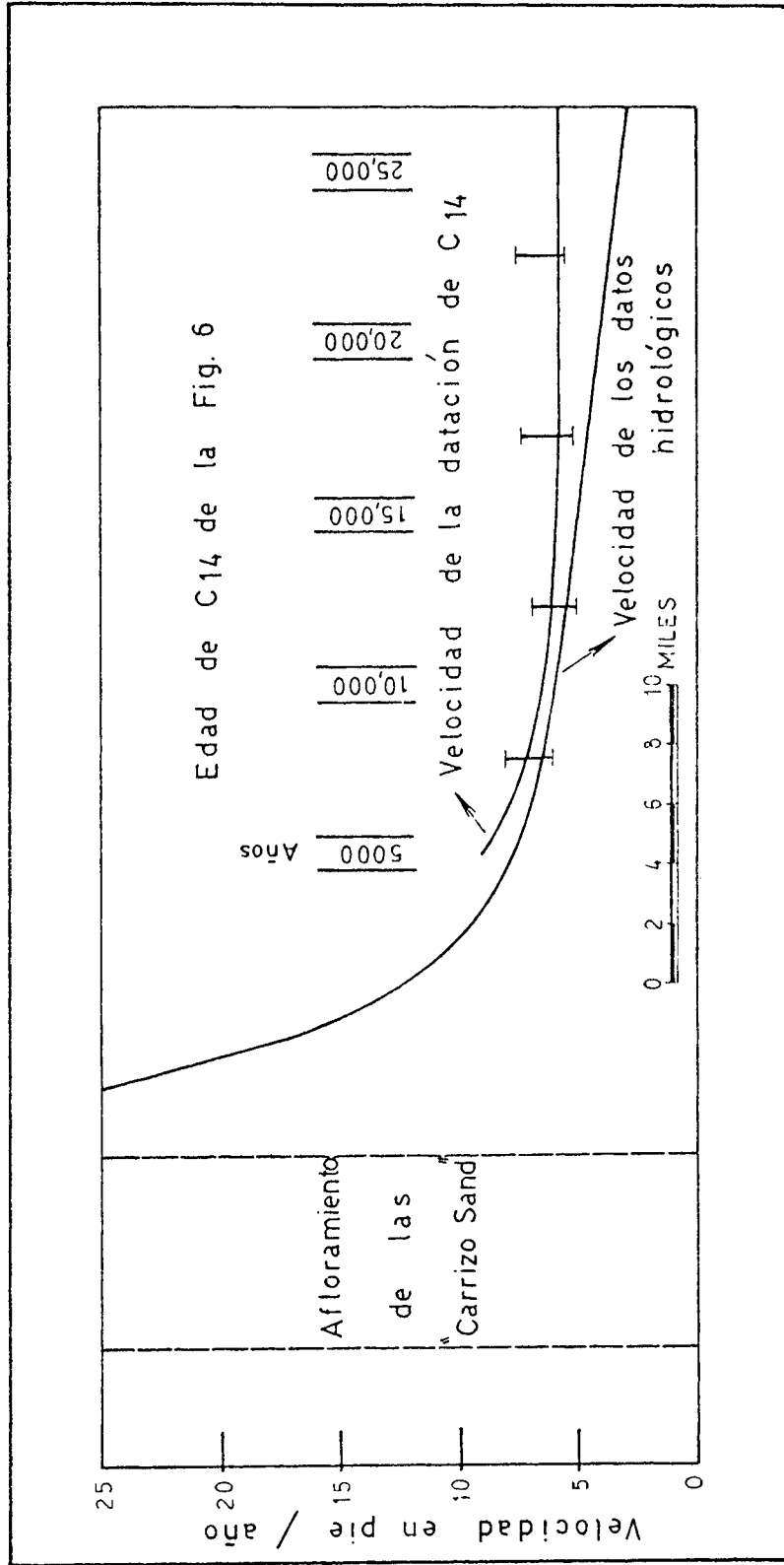


Fig. 7

J.C. Vogel

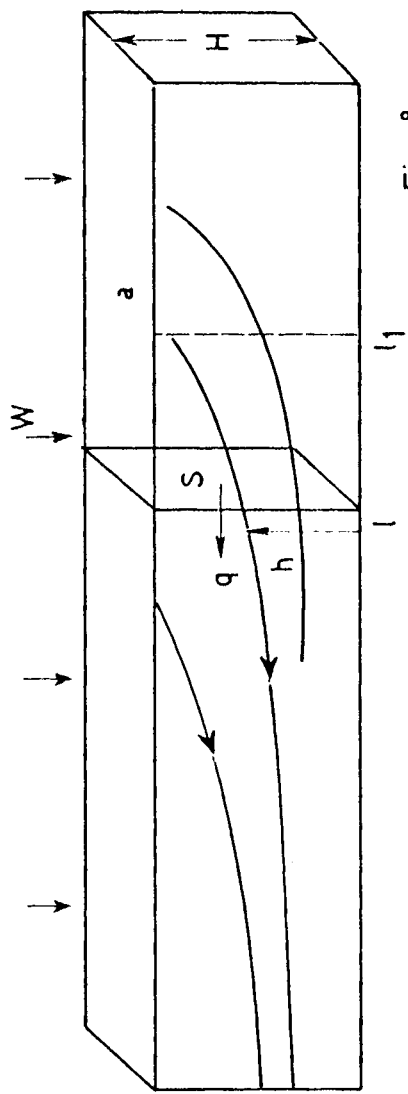


Fig. 8

J.C. Vogel

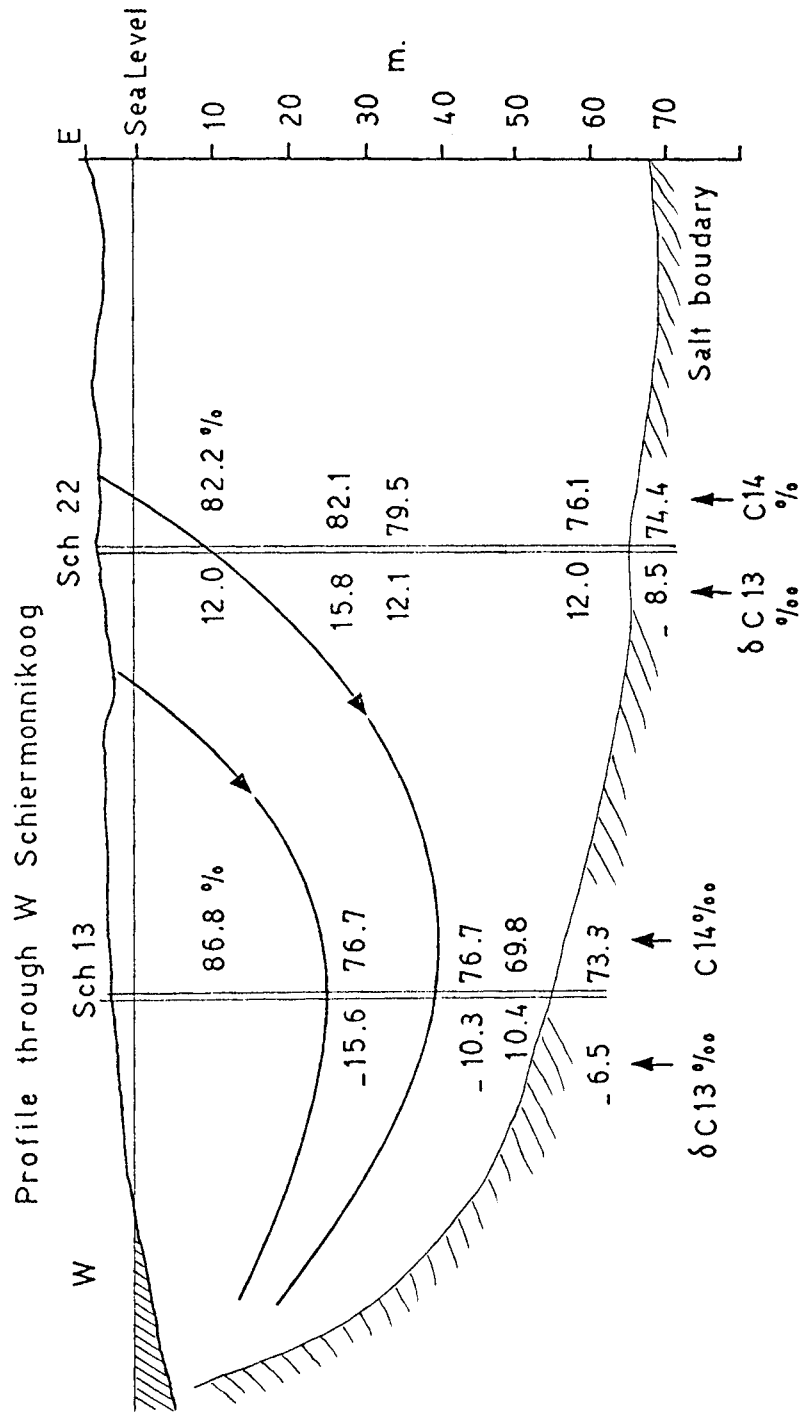


Fig. 9

J.C. Vogel

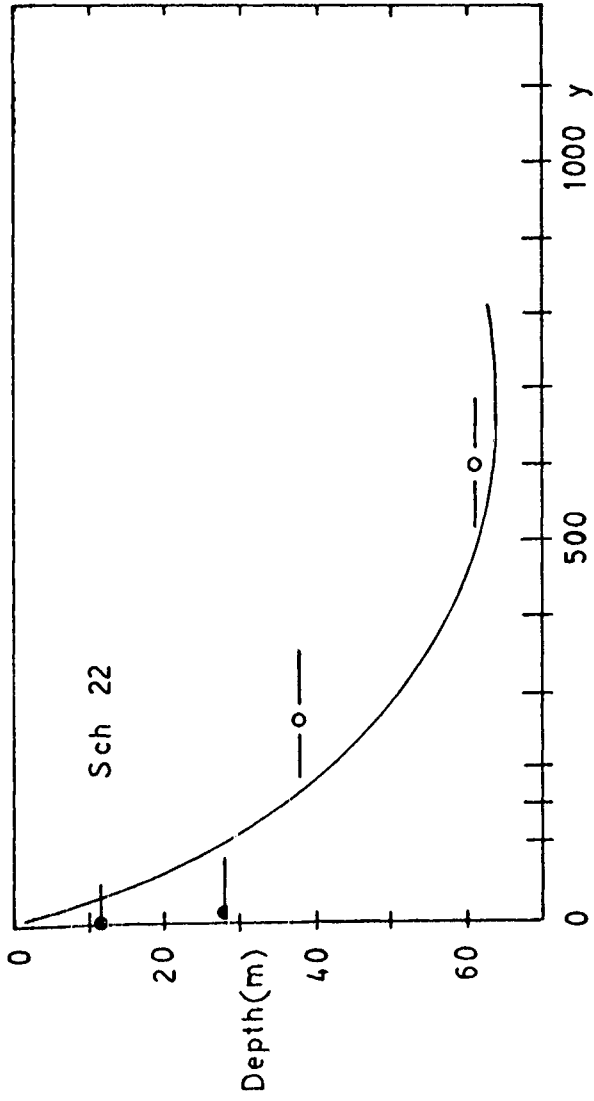


Fig. 10

