

DATAION DEL AGUA SUBTERRANEA EN LA SABANA DE BOGOTA Y SUS IMPLICACIONES HIDROGEOLOGICAS

CESAR RODRIGUEZ y GERMAN A. JIMENEZ¹

CONTENIDO

	<u>Página</u>
RESUMEN	206
ABSTRACT	206
1. CONSIDERACIONES	206
2. EL BALANCE HIDROGEOLOGICO	207
3. DATAION	209
3.1. FUNDAMENTOS DE LA DATAION	211
3.2. DIFICULTADES DE INTERPRETACION	212
3.2.1. MODELO DE TAMERS	212
3.2.2. MODELO DE VOGEL	213
3.2.3. METODO DE PEARSON	213
3.3. SELECCION DE POZOS	213
3.4. PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS	213
4. CALCULO DE LA INFILTRACION	216
5. RESULTADOS E INTERPRETACION	216
6. CONCLUSIONES	218
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	218

RESUMEN

Muestras de agua representativas de los principales acuíferos de la Sabana de Bogotá, fueron procesadas con el objeto de determinar su edad. Para tal fin se extrajeron los carbonatos y, haciendo síntesis de Benceno, se midieron las concentraciones del Carbono-14 presente en el agua.

Las edades encontradas en la mayoría de las muestras indican que el agua subterránea se infiltró hace miles de años, con excepción de aquella extraída de pozos cercanos a la zona de recarga.

Los resultados se utilizaron para calcular la tasa de infiltración, aplicando varios modelos matemáticos, obteniéndose valores relativamente bajos, del orden de milímetros por año.

La información resultante indica que la recarga del acuífero es en general muy pequeña como para ser tomada en cuenta en un balance hidrológico global.

Las conclusiones corroboran las hipótesis formuladas con base en el balance hidrológico, según las cuales la cuenca hidrogeológica de la Sabana de Bogotá es una cuenca cerrada sin afluencia ni efluencia substancial de agua subterránea.

ABSTRACT

Ground water samples from Bogotá plateau were processed for Carbon-14 dating by the benzene synthesis method. Ground water age indicates that infiltration took place thousands of years ago excepting water abstracted from wells located near the recharge area.

Results were used to calculate the infiltration rate by means of various mathematical models, reaching values in the order of few mm per year, which indicates that recharge amount is negligible as to be taken into consideration in the hydrological balance. This values corroborate the assumption made on the basis of hydrological information, which in fact leads to the conclusion that the hydrogeological basin not affluent not effluent.

1. CONSIDERACIONES GEOLOGICAS GENERALES

En favor de la simplificación, y teniendo en cuenta las características hidrogeológicas de las rocas existentes en la cuenca de la Sabana de Bogotá, se pueden agrupar según su capacidad para almacenar y permitir el flujo de agua, siguiendo la nomenclatura geológica existente.

Las rocas portadoras de agua se hallan en la parte superior de la Formación Guadalupe que constituye el acuífero principal, compuesto de areniscas con permeabilidad primaria y secundaria originada por la red de fracturas y diaclasas interconectadas. El espesor de esta parte de la formación es del orden de 600 m o más.

El acuífero se halla confinado en la parte superior por un conjunto de rocas impermeables, arcillas principalmente, conocido como la Formación Guaduas que tiene un espesor superior a los 500 m. En la parte inferior del acuífero se encuentra una serie de rocas impermeables, integradas por arcillas y lutitas de la parte inferior de la Formación Guadalupe y por la Formación Villeta, con espesores superiores a los 400 m.

Suprayacente a este conjunto se encuentran los depósitos cuaternarios que se manifiestan en toda la parte plana de la Sabana, con espesores que pueden alcanzar y superar los 200 m de profundidad, constituidos por rocas en su mayoría impermeables. Esporádicamente se encuentran pequeños acuíferos superficiales de poca importancia como rocas almacedoras y de escasa importancia para efectos del análisis hecho en esta memoria.

El marco geológico de la Sabana de Bogotá presenta entonces un acuífero confinado, limitado en sus partes superior e inferior por rocas impermeables, conformando una estructura sinclinal de las características apreciables en la Figura 1. Tal estructura es característica en la Sabana y tiende a cerrarse en igual forma hacia el sur de la misma, en el valle del Río Tunjuelo.

De las condiciones geológicas prevalecientes, puede inferirse que se trata de una cuenca hidrogeológicamente cerrada sin entradas ni salidas de agua de la misma; esto es, que los componentes del ciclo hidrológico correspondientes al agua subterránea son iguales a cero.

2. EL BALANCE HIDROLOGICO

La ecuación general del ciclo hidrológico puede expresarse en los siguientes términos:

Entradas = salidas + cambio de almacenamiento.

$$P = I + E + R \pm A_s \quad (1)$$

o más detalladamente:

$$P = E_v + R_1 + R_2 + R_3 + A_s \quad (2)$$

en donde:

- P = Precipitación
- I = Infiltración
- R = Escorrentía total
- R₁ = Escorrentía superficial
- R₂ = Escorrentía subsuperficial
- R₃ = Flujo base
- A_s = Agua subterránea

Aplicando la asunción de que la cuenca de la Sabana de Bogotá es una cuenca hidrogeológica cerrada, tendremos:

El parámetro (1) se hace igual a cero puesto que si no hay entradas ni salidas de agua subterránea y los acuíferos están completamente saturados no puede haber recarga de ellos. El valor (I) puede sí infiltrarse como flujo subsuperficial o flujo base y aparecer posteriormente en el Río Bogotá en forma de escorrentía total R.

Siendo el valor A_s de la misma manera igual a cero, nos quedará la siguiente relación:

$$P = E + R$$

Si al despejar de esta última ecuación el valor E, resulta igual al calculado por el méto-

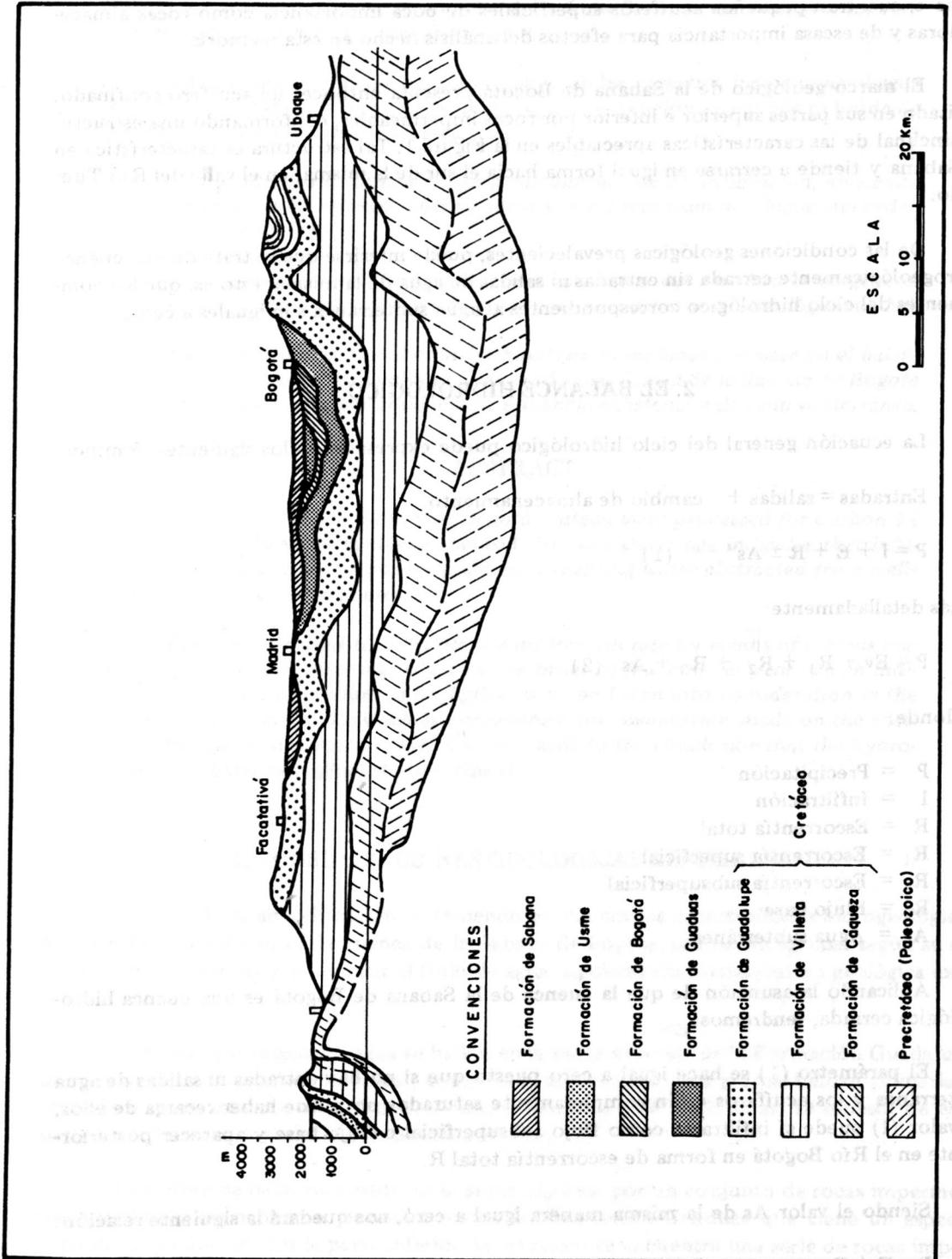


FIG. 1: Corte geológico de la Sabana de Bogotá (Van der Hammen).

do que ofrezca mayor confiabilidad, se confirmará la teoría basada en las características geológicas, de que la cuenca de la Sabana de Bogotá es una cuenca cerrada sin afluencia ni efluencia de agua subterránea.

Los cálculos tendientes a evaluar los diferentes parámetros fueron hechos con datos hidrogeológicos correspondientes a un período de 20 años (RODRIGUEZ, 1978); un resumen de los resultados se presenta en la Figura 2.

El balance hidrológico indica también que la cuenca hidrogeológica es cerrada. Si es en realidad cerrada, tal condición supondría que no hay flujo de agua subterránea si los acuíferos están saturados de agua y bajo tales circunstancias el agua sería relativamente vieja. Esta teoría indujo a realizar una serie de mediciones tendientes a determinar la edad del agua subterránea, en muestras extraídas de pozos profundos, tema central de la memoria.

3. DATAION

Como edad de un agua subterránea se entiende el tiempo transcurrido desde su precipitación sobre la superficie de la tierra, y su infiltración en el subsuelo, hasta su llegada al punto del cual se extrae la muestra. Como es lógico este tiempo depende por una parte, de la distancia existente entre dicho punto y la zona de recarga, y por otra, de los parámetros del acuífero que influyen en el tiempo de tránsito, es decir, distribución de líneas de flujo, permeabilidad, dispensividad, etc. En el supuesto de que todos estos parámetros fuesen conocidos, la distribución de la edad del agua podría deducirse por consideraciones exclusivamente hidrológicas. Sin embargo, en la práctica ello no es posible casi nunca, debido a la complejidad del sistema y por tanto, el problema tiene que plantearse en forma inversa; es decir, las características de la recarga del acuífero tienen que ser deducidas a partir de la edad del agua, obtenida radiométricamente.

El único procedimiento de datación directa del agua, conocido en la actualidad, es el basado en la medida de los materiales radioactivos transportados por ésta. Las técnicas más desarrolladas se basan en la medida de concentración de tritio y de Carbono-14. Uno de los mayores atractivos de esta técnica es la posibilidad que ofrece de investigar el comportamiento del agua en la totalidad del acuífero.

Las técnicas de datación con radioisótopos pueden proporcionar información sobre los siguientes puntos:

- A — Determinación de líneas de flujo y velocidad del agua.
- B — Localización de zonas de recarga y descarga.
- C — Interconexión entre acuíferos o entre acuíferos y fuentes.
- D — Detección de fracturas y aberturas.
- E — Características de la dispensión hidrodinámica.
- F — Determinación absoluta de la edad.

Sin embargo, debido a los inconvenientes de estas técnicas, la interpretación de las medidas de tritio o Carbono-14, tiene que llevarse a cabo con una gran precaución y apoyándose siempre en los principios de la hidrodinámica, así como en los datos conocidos del acuífero.

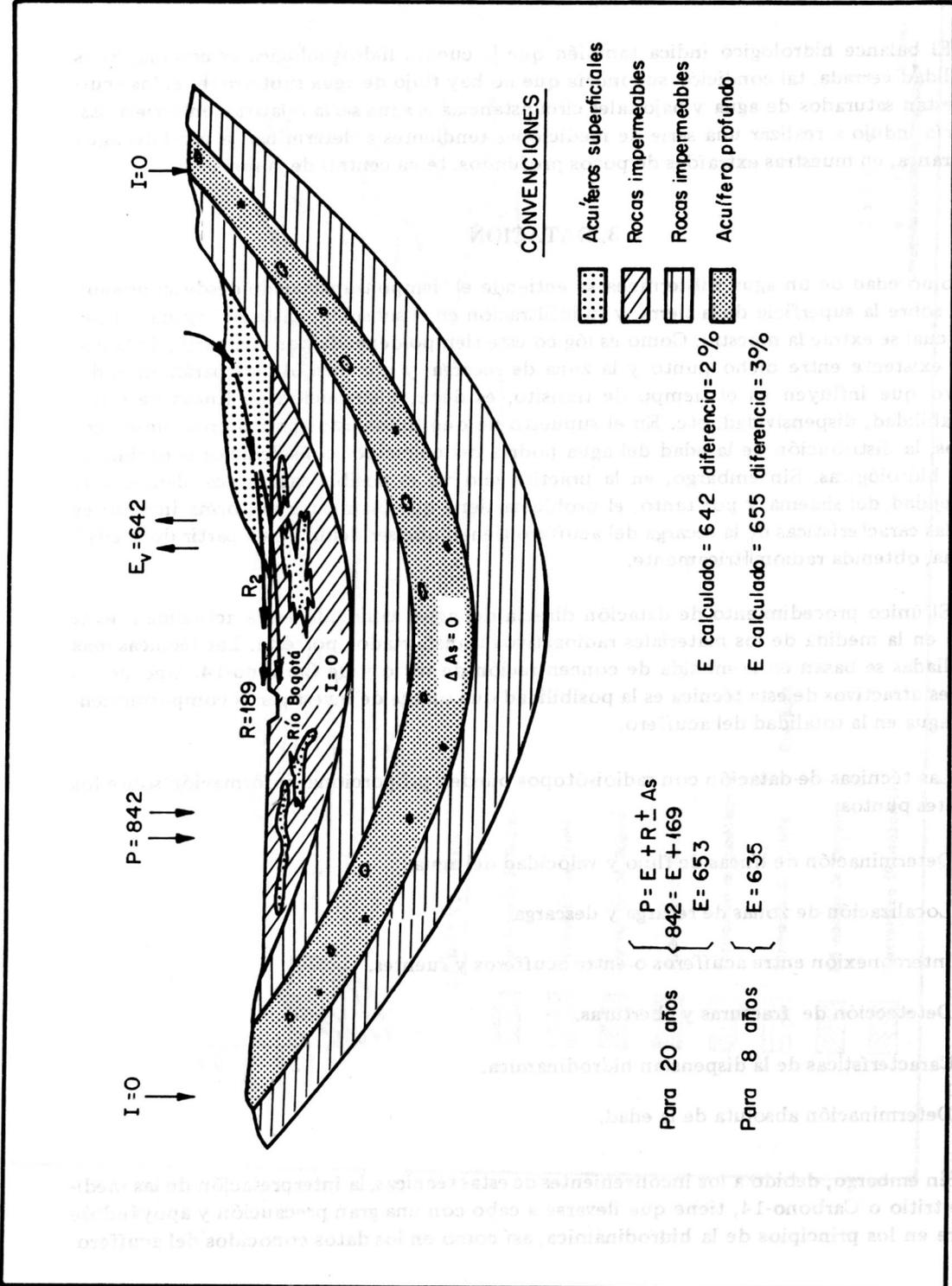


FIG. 2: Esquema que señala los componentes del ciclo hidrológico en la cuenca de la Sabana de Bogotá. Valores expresados en milímetros y calculados para un intervalo de 20 años (Período 1951 - 1970).(RODRIGUEZ, 1978).

3.1. FUNDAMENTOS DE LA DATAACION

El agua que penetra en el acuífero lleva consigo átomos radiactivos, bien formando parte de sus moléculas (tritio), o bien en solución (Carbono-14).

Si el agua una vez infiltrada queda aislada totalmente de la fuente proveedora de dichos átomos radiactivos (atmósfera o suelo), y la concentración de éstos sólo es alterada por la desintegración radioactiva, dicha concentración varía en función del tiempo según la ley exponencial:

$$C_t = C_0 e^{-\lambda t}$$

en donde:

$$t = \frac{-1}{\lambda} \ln \frac{C_t}{C_0} = \frac{-t_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{C_t}{C_0}$$

Siendo:

C_0 = Concentración inicial o sea la concentración existente en el momento de producirse la infiltración.

C_t = Concentración actual de la muestra extraída.

t = Edad del agua.

El procedimiento que se sigue, consiste en determinar la concentración C_t en una o más muestras de agua extraídas del acuífero. A partir de la concentración inicial C_0 , que es preciso conocer, y del período de semidesintegración conocido, se determina la edad de cada muestra.

En el caso del Carbono-14, la datación se basa en la medida del Carbono-14 existente en los carbonatos del agua, la mayor parte de los cuales se deben a la disolución del CO_2 atmosférico y de las precipitaciones.

El CO_2 del suelo captado por el agua durante el proceso de infiltración, puede provenir a su vez del aire existente en los poros del suelo y, además, del CO_2 liberado por las plantas durante su proceso respiratorio y por los productos de descomposición de éstas.

Por tanto, el CO_2 del aire, como el del origen biogénico, han venido aportando al agua desde hace miles de años una concentración constante de C-14, equivalente a $C_0 = 15,2 \pm 0,1$ desintegraciones por minuto por cada gramo de carbono. Como el período de desintegración del carbono es de 5.500 años aproximadamente, este isótopo permite la datación de aguas muy antiguas, hasta un límite superior a los 30.000 años. El límite inferior de datación se estima en unos 200 años condicionados por los errores resultantes de la medida de la radioactividad.

El Carbono-14 ofrece además una segunda posibilidad de datación utilizable para aguas modernas. Esta posibilidad se deriva de la contaminación atmosférica, producida por las explosiones nucleares. La concentración de C-14 antes mencionada, se ha visto notablemente incrementada a raíz de estas explosiones llegando a valores próximos a 30 desinteg/minuto.

3.2. DIFICULTADES DE INTERPRETACION

Para conocer la edad del agua por la ecuación anterior, se debe conocer la concentración inicial C_0 de Carbono-14 o de tritio que tenía el agua de la muestra en el momento de producirse su infiltración. En el Carbono-14 esa concentración inicial es bien conocida pero se modifica por el contacto del agua con los materiales del medio en las que existen grandes cantidades de carbonatos. Por otra parte, un problema general de interpretación se basa en el mezclado de aguas de diferentes edades en el acuífero, como consecuencia de la dispensión, y sobre todo, de flujos irregulares de agua.

El tipo de mezclado tiene, casi siempre, escasa importancia para efectos de datación y una muestra de agua tomada de un punto del acuífero puede considerarse representación de una edad única.

En el caso de un acuífero homogéneo, donde las aguas viajen según un modelo tipo de pistón, el mezclado de aguas de diferentes edades sólo tienen lugar como consecuencia de los fenómenos de difusión nuclear y de dispensión (PLATA, 1975).

En cambio en el caso de acuíferos heterogéneos, los procesos de mezclado de aguas de diferentes edades, desempeñan un papel muy importante, constituyendo frecuentemente materia de especulación.

Sin embargo, es precisamente en este tipo de acuíferos donde las técnicas de datación con radioisótopos pueden ser de mayor interés, debido a las dificultades que plantean las investigaciones por otras técnicas.

Para determinar la actividad específica inicial C_0 que debe utilizarse en la datación de aguas subterráneas con C-14, se han seguido tres modelos diferentes: El Modelo de Tamers, el de Vogel y el de Pearson.

3.2.1. MODELO DE TAMERS

Admite que la cantidad total de carbonatos del medio, disueltos por el agua es la equivalente a la unidad de los bicarbonatos presentes. Este autor determina químicamente las concentraciones del CO_2 libre, y de bicarbonatos presentes en el agua, y, considera que todo el CO_2 más la mitad del bicarbonato son de origen biogénico. Con estas consideraciones, la edad se determina por la siguiente expresión (TAMERS, 1967):

$$t = -8035 \ln \frac{C-14 \text{ muestra}}{C-14 \text{ patrón}} \pm \frac{3}{4} \frac{8035 \ln C \text{ total}^{-1/2} CO_3H^-}{C \text{ total}}$$

$$\pm \frac{1}{4} \frac{8035 \ln C \text{ total}^{-1/2} CO_3H^-}{C \text{ total}}$$

En esta expresión, el factor 8035 equivale a la relación $t^{1/2}/\ln 2$ para el Carbono-14.

C-14 muestra y C-14 patrón, representa, respectivamente, las actividades específicas de C-14 para la muestra de agua y para el patrón de carbono moderno. Como patrón de carbono moderno se emplea universalmente ácido oxálico, preparado por el National Bureau of Standards de Washington, EE. UU.

3.2.2. MODELO DE VOGEL

Utiliza un criterio basado en términos experimentales; según el autor, todas las muestras de agua moderna, no contaminadas con Carbono-14 de las explosiones atómicas, presentan una actividad específica que oscila entre el 80 y 90% de la correspondiente al patrón o carbono moderno. Estos valores han sido comprobados en numerosas muestras de agua procedentes de muy diversos acuíferos de zonas con climas distintos. Según este criterio puede tomarse como C_0 el 85 ± 5 por 100 de la actividad específica del patrón o carbono moderno. La edad se obtiene por la siguiente expresión (VOGEL, 1963):

$$t = -8035 \ln \frac{\text{C-14 muestra}}{(0,85 \pm 0,05) \text{ C-14 patrón}}$$

3.2.3. METODO DE PEARSON

Desarrolla un criterio basado en la relación de isótopos estables, Carbono-13 y Carbono-12 de las especies carbonatos de agua (PEARSON, 1965).

Los resultados experimentales obtenidos por estos métodos, demuestran que los criterios descritos conducen a valores de la edad que son similares en la mayoría de los casos.

3.3. SELECCION DE POZOS

Se seleccionaron 20 pozos localizados como se muestra en la Figura 3.

3.4. PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS

En cada uno de los pozos seleccionados se tomaron muestras de aproximadamente 800 litros de agua (4 canecas de 55 galones cada una). Para esto el agua se extraía directamente del pozo a las canecas evitando cualquier posible contacto con el aire para no alterar la muestra.

Posteriormente se hizo precipitación de carbonatos, que consiste en adicionar ácido clorhídrico concentrado, en cada uno de los recipientes que contienen agua, con el fin de convertir los bicarbonatos a dióxidos de carbono. El CO_2 disuelto es arrastrado por una corriente de nitrógeno y atrapado en una solución de hidróxido de amonio. Toda operación se realiza en un sistema cerrado y con circulación permanente de nitrógeno (Ver Fig. 4).

El dióxido de carbono reacciona con el NH_4 para formar $(NH_4)_2CO_3$ que es retenido en solución. El carbonato es finalmente precipitado con una solución de cloruro de bario resultando $BaCO_3$, el cual se filtra y seca en un horno. El carbonato de bario se usa como punto de partida en la síntesis de benceno.

El paso siguiente es hacer la síntesis de benceno para datación, que se efectúa en un equipo especialmente diseñado para realizar las siguientes etapas:

— El carbonato de bario se ataca con ácido clorhídrico para producir CO_2 así:



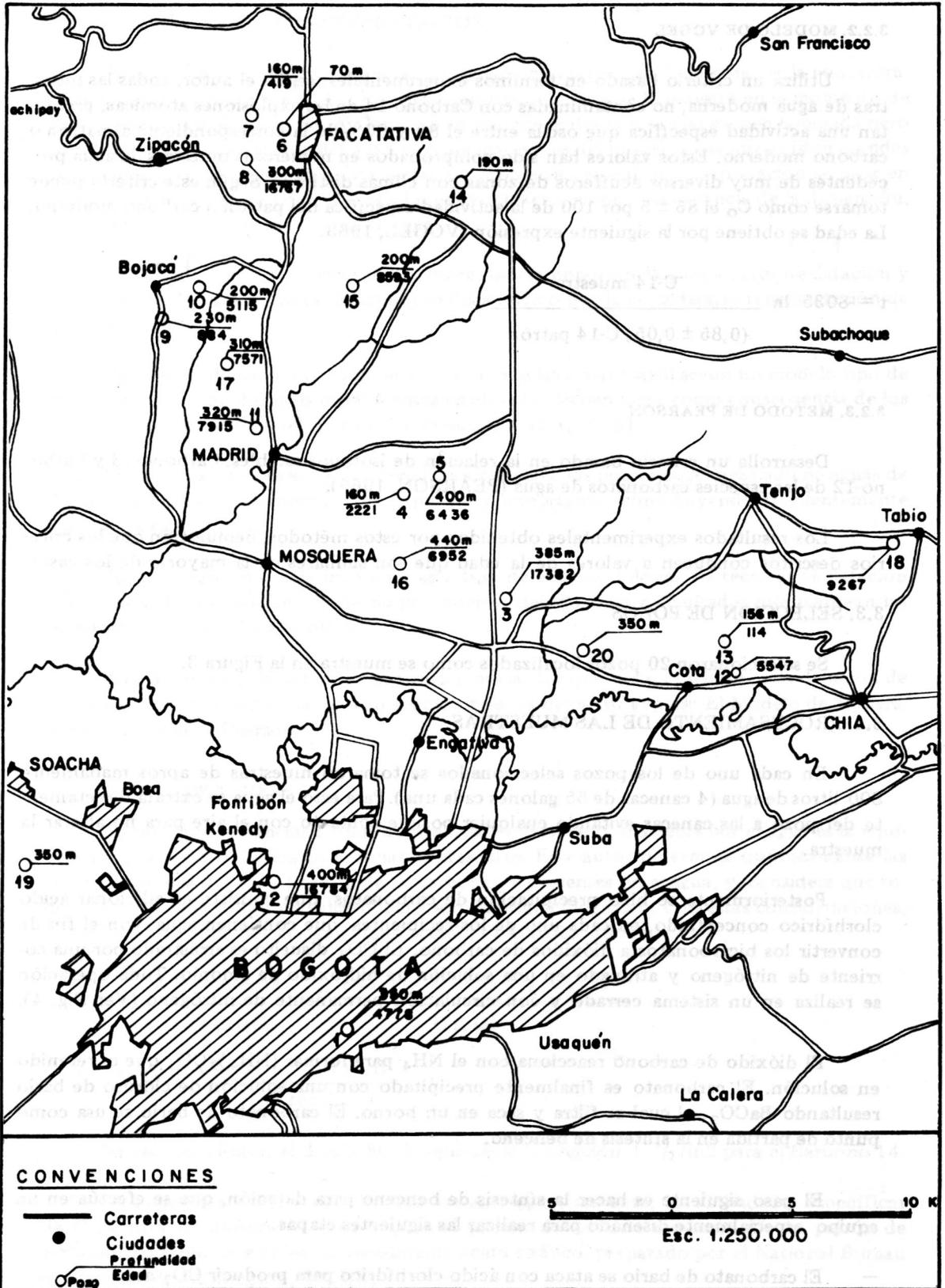
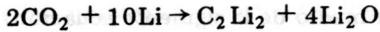
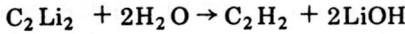


FIG. 3: Mapa del área muestreada y localización de los pozos.

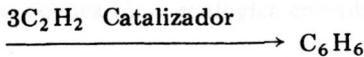
- Luego el bióxido de carbono se hace reaccionar con litio metálico a elevada temperatura (720°C) obteniéndose carburo de litio:



- En seguida se hace fluir agua a través del carburo de litio para producir acetileno.



El acetileno una vez purificado, se hace pasar por una columna catalizadora de alúmina, donde se efectúa la conversión a benceno, según la reacción:



El benceno se recupera mediante la destilación en vacío a una temperatura de 150°C.

A cada una de las muestras obtenidas en la síntesis del benceno, se les adicionan algunos mililitros de PPO y POPOP, lo mismo se hace con el patrón de carbono moderno.

Además de las muestras patrón y problema, se preparan algunas muestras de benceno comercial y solución luminiscente para las medidas de contaje de fondo.

Todas estas muestras se someten a un contaje en un espectómetro de centelleo líquido para contar las radiaciones beta emitidas por el Carbono-14, durante un tiempo determinado (200 minutos). El cálculo de la edad se hace por comparación de la actividad de la muestra con la del estandar moderno o patrón, según el modelo seleccionado. Los resultados se indican en la Tabla 1.

POZO No.	POZO	EDAD (Años) METODO TAMERS	EDAD (Años) METODO VOGEL	PROFUNDIDAD CADA POZO
1	Bavaria Centro	X 6.083	4.778	350 m
2	Bavaria Techo	X 18.090	16.784	190 m
3.	Manantial	X 18.688	17.382	385 m
4.	S. Andrés I	X 3.527	2.221	160 m
5.	S. Andrés II	X 7.742	6.436	400 m
6.	Promasa I	Edad Moderna	Edad Moderna	70 m
7.	Promasa II	X 1.725	419 (Moderna)	160 m
8.	Cartagenita	X 18.073	16.767	300 m
9.	Bojacá I	X 2.189	884 (Moderna)	230 m
10	Bojacá II	X 6.421	5.115	200 m
11.	Madrid	X 9.291	7.915	320 m
12.	Cota I	Edad Moderna	Edad Moderna	106 m
13.	Cota II	Edad Moderna	Edad Moderna	156 m
14.	Suizer	Edad Moderna	Edad Moderna	190 m
15.	Córsega	X 9.899	8.593	200 m
16.	S. Ramón	X 8.258	6.952	440 m
17.	P. Grande	X 8.870	7.571	310 m
18.	Tabio	X 10.573	9.267	—

TABLA 1. RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE C-14 EN MUESTRAS DE AGUA PROVENIENTES DE LA SABANA DE BOGOTA

4. CALCULO DE LA INFILTRACION

Con los valores obtenidos a partir de la edad y la profundidad en cada uno de los pozos, se determinó la recarga del acuífero o la filtración, por medio de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{Po \cdot d}{w} \quad \text{donde } W = \frac{Po \cdot d}{t}$$

Siendo:

d = Profundidad

t = Tiempo

w = Infiltración

El valor de Po, o sea la porosidad se tomó de acuerdo con la clase de roca: de 0,05 a 0,2.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la infiltración para aquellos pozos en los cuales se conoce la edad o sea la variable t.

POZO	INFILTRACION (cm/año)
Bavaria Centro	0,36
Bavaria Recho	0,05
Manantial	0,11
San Andrés I	0,36
San Andrés II	0,31
Cartagenita	0,36
Bojacá II	5,90
Madrid	2,60
Córsega	0,11
S. Ramón	0,31
P. Grande	0,20

TABLA 2. VALORES DE INFILTRACION OBTENIDOS EN VARIOS SITIOS DE LA SABANA DE BOGOTA

5. RESULTADOS E INTERPRETACION

Hay que destacar que la interpretación de los resultados debe hacerse con mucho cuidado, haciendo referencia a la edad del C-14 que, a juicio del autor, no siempre representa la edad del agua subterránea en términos absolutos, debido a la variedad de factores que entran en juego y que están relacionados con la interacción química o bien con la mezcla y difusión del carbono o por fenómenos puramente hidrodinámicos que, si no se tienen en cuenta, pueden conducir a errores de gran magnitud. Tales consideraciones suponen que las características hidrogeológicas del área juegan un papel importantísimo en la interpretación y correlación de las edades.

Si se agrupan los resultados de acuerdo con la magnitud de la edad, en muestras modernas (menores de 500 años) y aguas relativamente viejas (edad superior a los 5.000 años), pueden hacerse las siguientes observaciones:

Las muestras que señalan aguas modernas provienen de pozos que captan el acuífero principal (Formación Guadalupe), relativamente cerca de la zona de recarga (Fig. 3), lo cual resulta concordante con la realidad, puesto que cerca de la zona de infiltración deben encontrarse las muestras más recientes y a mayor distancia del área de recarga se encontrará agua cada vez más vieja, a medida que se aleja en la dirección de movimiento del agua subterránea.

Los pozos Cartagenita y Madrid que captan agua del Guadalupe y señalan edades del orden de 8.000 y 17.700 años respectivamente, extraen el agua a una distancia no muy lejana del área de recarga. Tal circunstancia indica que no hay recarga reciente porque no hay flujo y el acuífero principal se halla saturado desde hace miles de años; es decir, que no hay escape de agua subterránea hacia otras cuencas, corroborándose la hipótesis establecida inicialmente con base en la temperatura geológica y el balance hídrico, de que la Sabana de Bogotá es una cuenca hidrogeológica cerrada.

Todas las muestras extraídas de pozos que captan agua de la Formación Sabana, tienen edades superiores a los 5.000 años, lo cual indica que no poseen recarga reciente y que si se acepta la presencia de infiltración, ella es insignificante, como se infiere de la Tabla 2.

Las aguas termales de Tabio y El Manantial señalan edades de 9.000 y 17.000 años respectivamente. Son, pues, de origen meteórico pero se infiltraron hace miles de años alcanzando la profundidad suficiente para calentarse, porcolándose lentamente a través de la roca y emanando finalmente a lo largo de aberturas de origen secundario.

El agua tomada de la Formación Guadalupe muestra una mayor tasa de flujo como es de esperarse, ya que el mencionado acuífero tiene mayor permeabilidad. La presencia de agua reciente solo puede establecerse con análisis de tritio, radioisótopo que permite determinar la edad del agua subterránea hasta valores del orden de 50 años; esta investigación está programada para una próxima etapa.

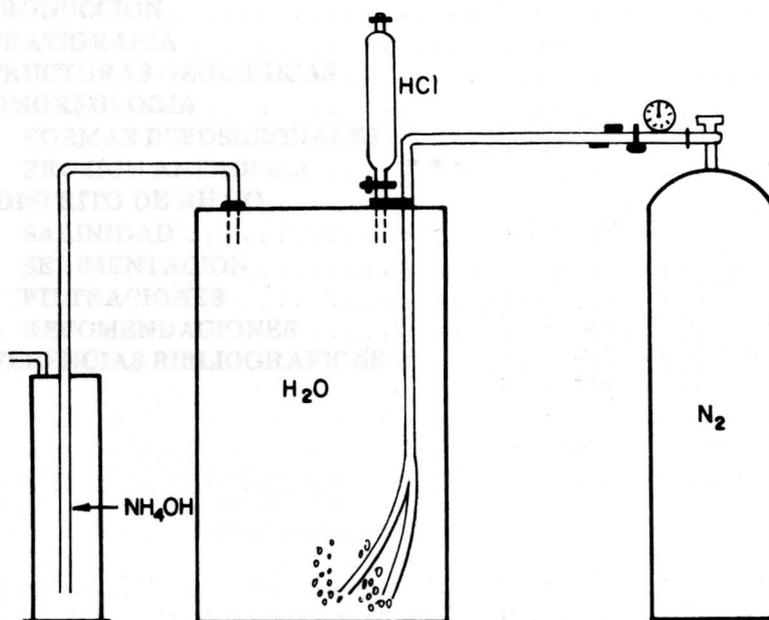


FIG. 4: Sistema utilizado para la extracción de carbonatos de las muestras de agua.

6. CONCLUSIONES

El agua extraída de las Formaciones Gudalupe y Sabana es agua relativamente vieja, lo cual indica que no existe una recarga substancial de los acuíferos.

Correlacionando la información hidrológica con la estructura geológica del área y teniendo en cuenta la edad del agua subterránea, se infiere que no hay flujo de agua en el acuífero de la Formación Guadalupe, dado que la cuenca hidrogeológica está saturada y, por tanto, no existe afluencia ni efluencia de ellas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- PEARSON, F. J., 1970.- "*Sources of Dissolved Carbonate Species in Ground Water and their Effects on Carbono-14 Dating*" Isotopes in Hydrology. Viena. IAEA, (Proc. Symp. Viena, 1965).
- PLATA, A., 1975.- *Isótopos en Hidrogeología*. Madrid. Alhambra, p. 226.
- RODRIGUEZ, C., O., 1978.- *Balace Hidrológico de la Sabana de Bogotá, Una Cuenca Prototipo*. ACODAL, (Bogotá), 21 (81).
- TAMERS, M. A., 1967.- "*Surface-Water Infiltration and Groundwater Movement in Arid Zones of Venezuela*" Isotopes in Hydrology. Viena, IAEA (Proc. Symp. Vienna, 1966), p. 330-53.
- VAN DER HAMMEN. T., 1957.- *Sabana de Bogotá. Estratigrafía Palinológica. Informe 1220*. Bogotá, Serv. Geol. Nal.
- VOGEL, J. C., 1963.- "*Use of Carbon Isotopes in Groundwater Studies*". Radioisotopes in Hydrology. Vienna. IAEA. (Proc. Symp. Tokyo, 1963). p. 388.

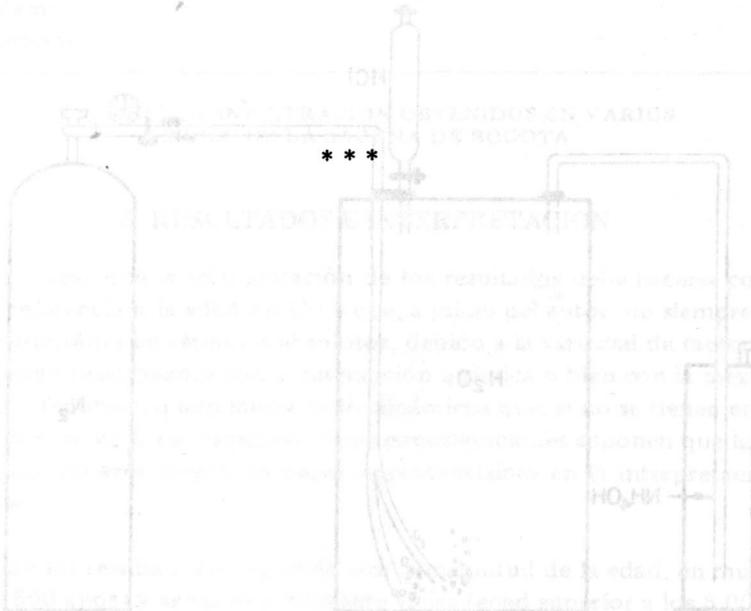


FIG. 4: Sistema utilizado para la extracción de carbonatos de las muestras de agua.