

ENFOQUE GEOQUIMICO DE DOS PROBLEMAS GEOTECNICOS EL TUNEL DE PALACIO. EL DESLIZAMIENTO DE QUEBRADABLANCA

CESAR O. RODRIGUEZ N *

RESUMEN

Dos problemas geotécnicos causados por flujos de agua subterránea, fueron plenamente identificados aplicando técnicas geoquímicas. El primero se relaciona con el túnel de Palacio donde una infiltración de 4.000 l/mint, originó derrumbes y otros problemas que mantuvieron paralizada la construcción durante varios meses. Con el objeto de prever problemas adicionales y programar las respectivas obras de ingeniería, se realizó un estudio tendiente a identificar el origen del agua subterránea. Se tomaron muestras de agua de las cuatro posibles fuentes: una laguna una serie de grietas de gran magnitud, los depósitos fluvio-glaciares de superficies y de la Arenisca de Guadalupe que aflora a un kilómetro del sitio de derrumbe. Correlacionando el resultado de los análisis geoquímicos con la información geológica e hidrológica del área se concluyó que el agua subterránea fluye de las Areniscas del Guadalupe a través de fracturas y aberturas de origen secundario. El segundo problema estudiado es el deslizamiento de Quebradablanca, debido a infiltración y percolación del agua en los depósitos aluviales. Se había diseñado un sistema de drenaje con el objeto de interceptar y captar las aguas de infiltración directa sobre el aluvión e impedir así su saturación. La investigación se hizo para determinar si existe

* Hidrogeólogo. M. Sc. Jefe Aplicaciones en Hidrología. Instituto de Asuntos Nucleares, Bogotá.

flujo subterráneo proveniente de las rocas adyacentes al aluvión. Los resultados del análisis geoquímico indican que la mayor parte del agua proviene de la roca dura adyacente y no es infiltración directa del agua lluvia sobre el aluvión. Esta circunstancia señala que el drenaje diseñado no es suficiente para impedir la saturación de la roca y que un sistema muy complejo y costoso sería necesario para controlar el flujo de agua subterránea. Se concluye de ambos estudios, que donde el agua subterránea constituye la causa principal de cualquier problema geotécnico, la identificación completa del régimen hidrológico superficial y subterráneo, es necesaria si se desea lograr un diseño correcto de las obras de construcción, recuperación, conservación o drenaje, en la agreste cordillera de los Andes.

EL TUNEL DE PALACIO

Identificación del problema

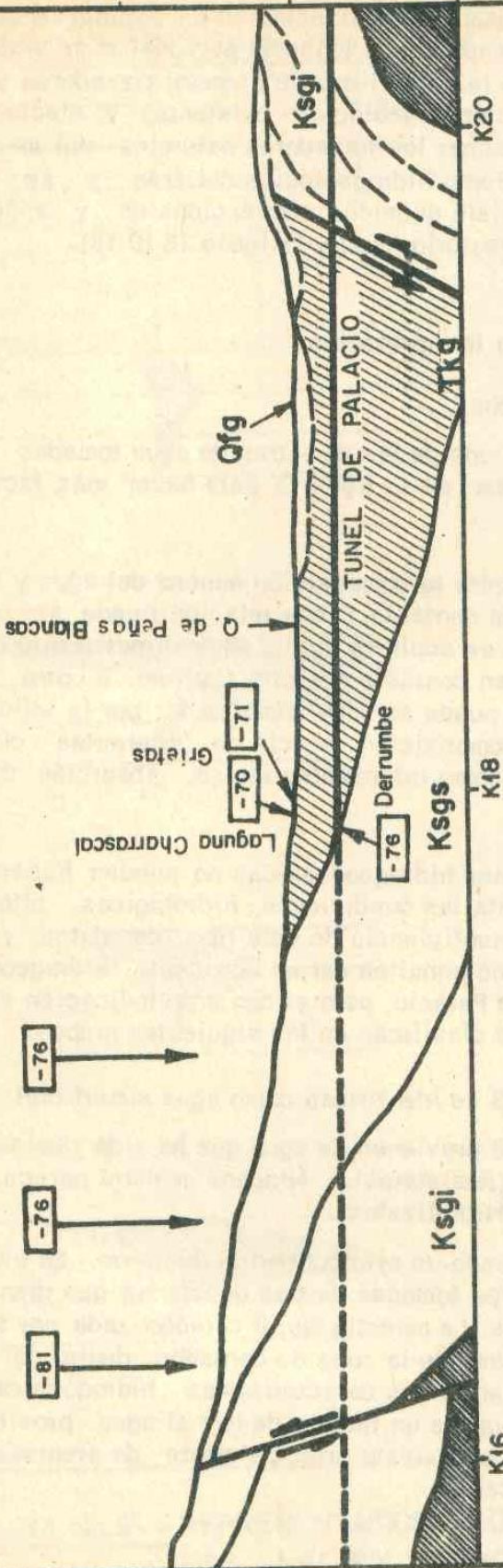
Dentro de las obras que se están efectuando para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, con el propósito de ampliar el suministro de agua potable para la capital, se está construyendo uno de los túneles de conducción en el área conocida como las Minas de Palacio al oriente de la ciudad,

El avance del túnel (denominado túnel de Palacio), estuvo suspendido por varios meses debido a un derrumbe de 30 m. que se presentó en el frente de trabajo, causado por una infiltración de agua subterránea del orden de 60-70 litros/segundos. El derrumbe se produjo en la formación Guaduas, (compuesta de arcillolitas y limolitas), en la zona de contacto con la formación Guadalupe (compuesta principalmente de areniscas). Sobre la formación Guaduas, en la Zona del derrumbe, existen unos depósitos fluvio-glaciales de pequeño espesor. Los ingenieros consideraron que las infiltraciones podrían tener su origen en: (figura 1).

- 1) Los depósitos fluvio-glaciales de superficie, localizados encima de la Formación Guaduas.
- 2) La laguna Charrascal (con un volumen de unos 5.000 m³ aproximadamente), situada a unos 120 m. de la línea de dirección del túnel.
- 3) Una serie de grietas de gran magnitud por las que fluyen pequeños arroyos y que están localizadas en superficie, al lado opuesto de la laguna Charrascal a unos 200 m. de la línea de dirección del túnel.
- 4) La Formación Guadalupe* (compuesta principalmente de areniscas y calizas).

* Se utiliza el nombre Guadalupe a pesar de que por definición en el léxico estratigráfico internacional, no aparecen calizas en dicha formación.

4000
3500
3000
2500



CONVENCIONES

- | | | | |
|-------------|------------------------------------|--------------|---|
| Qfg | Depósitos fluvioglaciares. | -81 | Sitio de muestreo aproximado y contenido de Deuterio. |
| Tkg | Guaduas - arcillolitas | | Túnel construido. |
| Ksgs | Guadalupe Sup.-areniscas, calizas. | | Túnel por construir |
| Ksgi | Guadalupe Inf. areniscas, lutitas. | NOTA: | Información geológica suministrada por INGETEC, Ltda., con base en datos superficiales. |

s.g.s.

FIGURA No. 1.-- CORTE GEOLOGICO A LO LARGO DEL TUNEL DE PALACIO

La compañía de Ingenieros INGETEC LTDA. (Interventores de la obra) solicitó al Instituto de Asuntos Nucleares (IAN), la realización de un estudio tendiente a identificar el origen del agua drenada por el túnel. El personal técnico del grupo de Hidrología del (IAN), descartó la posibilidad de inyectar trazadores artificiales dadas las distancias y condiciones geológicas existentes y efectuó un estudio hidrogeoquímico para aprovechar los trazadores naturales del medio. Con este objeto se hizo un reconocimiento hidrogeológico del área y se tomaron muestras de agua para hacer análisis químicos convencionales y análisis de los isótopos pesados del agua, Deuterio (H-2) y Oxígeno 18 (O-18).

Técnicas utilizadas. Resultados e interpretación

a) Análisis Hidrogeoquímicos.

El resultado de los análisis químicos de las muestras de agua tomadas por INGETEC, se muestra en los diagramas de la figura 2, para hacer más fácil su interpretación.

En general, existe una relación entre la composición mineral del agua y la de las rocas con las cuales ha estado en contacto. Dicha relación puede ser comparativamente simple en casos donde un acuífero recibe agua directamente de la lluvia y reaparece luego sin entrar en contacto con otro acuífero u otro tipo de agua. De otra parte, la situación puede ser muy complicada por la influencia de dos o más acuíferos de variada composición, mezcla de diferentes clases de agua, reacciones químicas tales como intercambio iónico, absorción de iones disueltos y otros factores.

Es por esto que las interpretaciones hidrogeoquímicas no pueden hacerse independientemente sin tener en cuenta las condiciones hidrológicas, climatológicas y geológicas del medio. La insuficiencia de este tipo de datos y el poco número de muestras analizadas, no permiten dar un concepto hidrogeoquímico definitivo en el caso del túnel de Palacio, pero sí dan una indicación importante sobre el origen del agua, si se clasifican en los siguientes grupos:

- 1) Las muestras 5,6,7 y 9 se identifican como agua superficial.
- 2) Las muestras 2,3,4 y 8 provienen de agua que ha sido drenada de calizas y/o areniscas. (Resistatos). Ninguna muestra parece provenir de arcillas o lutitas (Hidrolizatos).
- 3) Las muestras 4 y 8 tienen un alto contenido de hierro. En efecto, las muestras 2, 3 y 4 fueron tomadas de tres quebradas que drenan áreas de areniscas y calizas. La muestra No. 8 caracterizada por su contenido de CaCO_3 y tomada de la zona de derrumbe dentro del túnel de Palacio, es muy similar en sus características hidroquímicas a las muestras 2,3 y 4 lo cual es un indicio de que el agua proviene de la Formación Guadalupe, compuesta principalmente de areniscas y calizas, en el área de recarga.

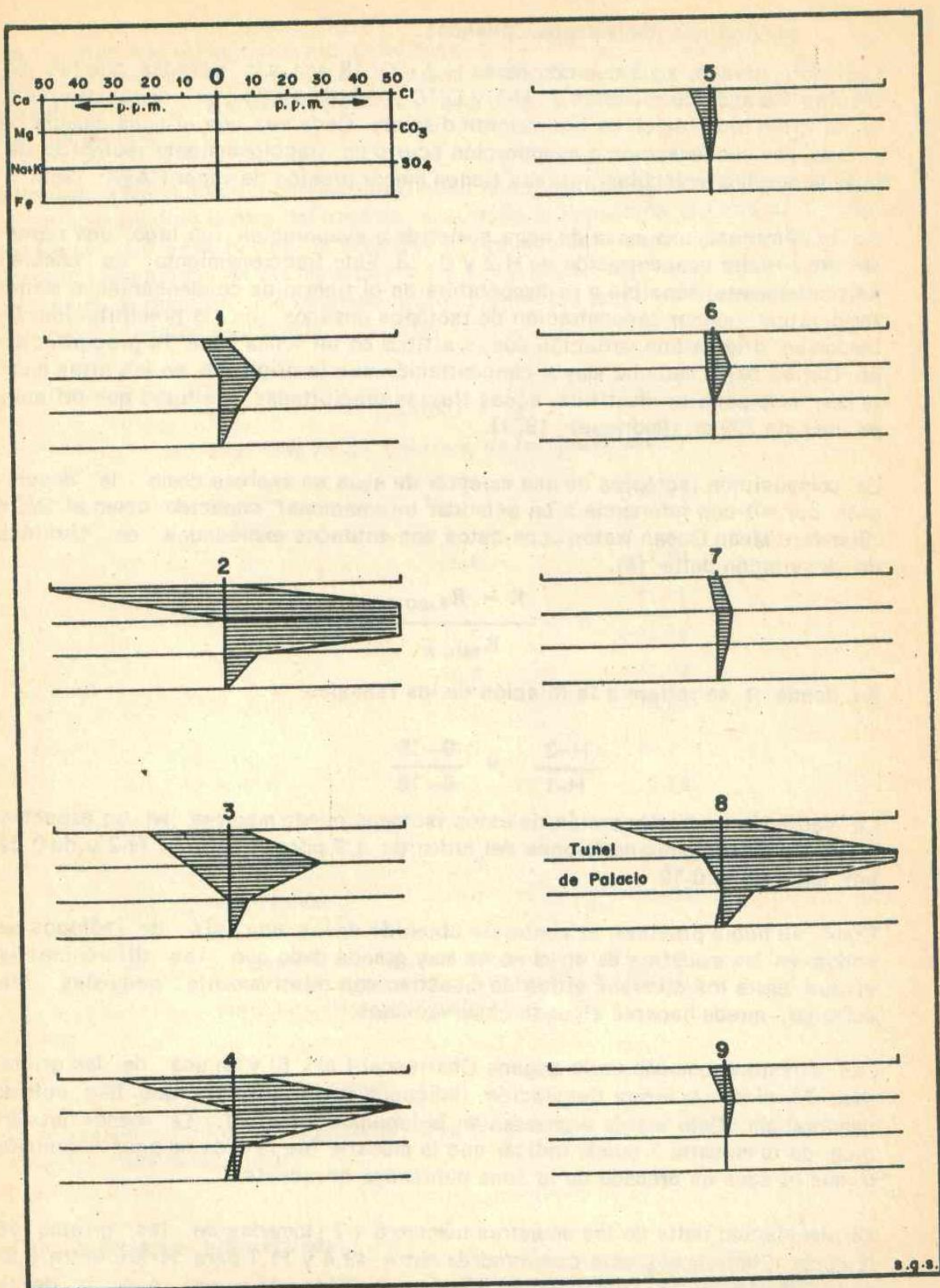


FIGURA No.2.—REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL RESULTADO DE LOS ANALISIS QUIMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA.

b) Análisis de isótopos pesados.

Las moléculas de agua que contienen H-2 y O-18 son más pesadas que las moléculas de agua compuestas de H-1 y O-16 y debido a ello su comportamiento en el ciclo hidrológico es ligeramente distinto. Cada vez que el agua cambia de estado por condensación o evaporación ocurre un fraccionamiento isotópico debido a que las moléculas pesadas tienen menor presión de vapor (IAEA, 1968).

De esta manera, una masa de agua sometida a evaporación (un lago, una represa etc.), sufre concentración de H-2 y O-18. Este fraccionamiento es también particularmente sensible a la temperatura en el tiempo de condensación; a menor temperatura, menor concentración de isótopos pesados en la precipitación. El fenómeno origina una variación con la altitud en tal forma que la precipitación en tierras bajas muestra mayor concentración que la originada en las altas montañas; ello permite identificar aguas lluvias precipitadas a alturas que difieren en más de 200 m. (Rodríguez, 1971).

La composición isotópica de una muestra de agua se expresa como la desviación por mil con referencia a un estándar internacional conocido como el SMOW (Standard Mean Ocean Water). Los datos son entonces expresados en términos de desviación delta (δ).

$$\delta = \frac{R - R_{SMOW}}{R_{SMOW}} \cdot 10^3$$

En donde R se refiere a la relación de los isótopos

$$\frac{H-2}{H-1} \quad \text{u} \quad \frac{O-18}{O-16}$$

La variación en la proporción de estos isótopos puede medirse en un espectrómetro de masas con precisiones del orden de ± 2 por mil para el H-2 y de 0,02 por mil para el O-18.

Como se había previsto, el contraste obtenido en los análisis de isótopos pesados en las muestras de agua no es muy grande dado que las diferencias en altitud entre los diversos sitios de muestreo son relativamente pequeñas. Sin embargo, puede hacerse algunas observaciones.

Las muestras tomadas en la Laguna Charrascal (No. 5) y en una de las grietas (No. 7), dieron la menor desviación, indicando que son aguas que han sufrido evaporación. Esto era de esperarse en la laguna Charrascal. La menor desviación de la muestra 7 puede indicar que la muestra fue tomada de agua estancada o que el agua es drenada de la zona pantanosa adyacente.

La desviación delta de las muestras número 6 y 7 (tomadas de las grietas) y 5 (Laguna Charrascal), está comprendida entre -49,4 y 71,1 para H-2 y entre 6,88 y 10,21 para O-18. Dicha desviación es sensiblemente menor que la de la muestra de agua tomada en el túnel.

Esto indica que el agua drenada en el túnel no proviene directamente de estas dos fuentes posibles y que tiene su origen en una zona de recarga localizada a mayor altitud. (Sin embargo, no puede descartarse el hecho de que sea de una mezcla de ellas)

La muestra No. 1 tiene la misma desviación que la del túnel y fue tomada en un punto comprendido dentro del área de recarga de la Formación Guadalupe. La muestra No. 2, que tiene la máxima desviación, fue tomada dentro de esta área. Los valores encontrados en las muestras 3, 4 y 9 las identificar como aguas representativas de la precipitación ocurrida igualmente en las posibles fuentes de recarga de la Formación Guadalupe.

CUADRO 1

Resultado de los análisis de isótopos pesados

Muestra No.	H - 2	O - 18
1	- 75,9	- 11,02
2	- 81,2	- 11,65
3	- 76,8	- 11,16
4	- 76,9	- 11,07
5	- 70,2	- 9,87
6	- 71,1	- 10,21
7	- 49,4	- 6,88
8	- 75,9	- 11,16
9	- 77,8	- 11,20
Agua lluvia	- 16,7	- 1,57

La pequeña desviación encontrada en el agua lluvia, indica que ella no fue tomada del pluviómetro sino del evaporímetro.

c) Observaciones de campo

El reconocimiento hidrogeológico del área en cuestión, permitió plantear las siguientes consideraciones:

Consideraciones hidrológicas

- 1) El volumen de la Laguna Charrascal es muy pequeño como para mantener un suministro continuo de agua al túnel de Palacio, al caudal que se ha mantenido durante varios meses. Sin embargo, la Laguna podía

estar alimentada por flujo directo del suelo, dado que el nivel piezométrico se encuentra muy alto. Esto podría aclararse con la inyección de un trazador.

- 2) Las grietas observadas, aunque son de gran magnitud no portan agua en cantidad suficiente como para mantener un flujo continuo al caudal observado en el túnel. Es de esperar, sin embargo, que dicho caudal sea mayor en épocas de lluvia.
- 3) La magnitud de las filtraciones en el túnel no han disminuído del invierno a la época del verano, es decir, que no existen fluctuaciones correlacionables con las condiciones hidroclimatológicas de la superficie.

Consideraciones geológicas

- 1) Entre los estratos subyacentes a la Laguna y a las grietas, se encuentran arcillas de permeabilidad insuficiente como para permitir un flujo continuo al caudal de infiltración existente en el túnel.
- 2) Los depósitos fluvioglaciares son de poco espesor y están localizados sobre arcillolitas de baja permeabilidad.
- 3) El buzamiento de los estratos en el área donde están localizadas las grietas y la Laguna Charrascal, indica que es poco probable la infiltración y movimiento del agua en dirección del derrumbe ocurrido en el túnel a través de planos de estratificación o de estratos de mayor permeabilidad.

Las consideraciones anteriores sugieren que el agua drenada por el túnel no tiene su origen en la Laguna Charrascal ni en las grietas o depósitos glaciares observados en la superficie.

Se considera que las areniscas de la Formación Guadalupe constituyen un acuífero de alta permeabilidad secundaria debido a fracturas ocasionadas por fallas perpendiculares al eje del túnel, y a conductos formados por la acción mecánica y de disolución del agua.

El área de recarga de dicho acuífero es muy extensa según pudo observarse en el reconocimiento de campo y en los mapas geológicos existentes.

El buzamiento general de las areniscas del Guadalupe es propicio al flujo de aguas subterráneas en dirección del túnel si se acepta un control estratigráfico. Pero como se mencionó anteriormente, la mayor parte del flujo ocurre probablemente a través de fracturas y aberturas lo cual supone que el movimiento del agua tiende a concentrarse a lo largo de dichas zonas. Si este es el caso, es probable que el flujo disminuya con el tiempo, y se agote una vez que todo el

volumen almacenado en las fracturas interconectadas, haya sido drenado. La figura 1, esquematiza el modelo hidrogeológico propuesto.

Conclusiones

Las observaciones hidrogeológicas y los datos geoquímicos sugieren que el agua subterránea drenada por el túnel, tiene origen en la Formación Guadalupe.

Si se acepta el modelo hidrogeológico propuesto, es claro suponer que se pueden encontrar problemas de infiltración a lo largo de la Formación Guadalupe donde quiera que el túnel corte fallas, planos de estratificación, fracturas, aberturas y zonas de alta permeabilidad. Si el flujo de agua ocurre principalmente a través de fracturas y aberturas es decir en zonas de alta permeabilidad secundaria, y no es homogéneo ni a través de planos continuos, es también posible que el túnel corte muy pocas o ninguna otra zona de alta permeabilidad.

EL DESLIZAMIENTO DE QUEBRADABLANCA

Identificación del problema

En el sector de Quebradablanca, sobre la carretera que conduce de Bogotá a Villavicencio se presentan (en la época lluviosa), derrumbes de tipo gravitacional traslacional que impiden el tráfico normal en tan importante vía.

Los derrumbes tienen como causa principal la infiltración y percolación del agua que satura la roca aumentando la presión de poros y disminuyendo la resistencia a los esfuerzos cortantes. Estos fenómenos conjugados con la naturaleza misma de los depósitos aluviales, fácilmente deleznable, originan la inestabilidad de la roca.

Dada la alta permeabilidad de los depósitos y el hecho de que los deslizamientos ocurren siempre en la época de invierno, los ingenieros concluyeron que la saturación de la roca causante de su inestabilidad, provenía principalmente de la precipitación directa del agua lluvia sobre los depósitos aluviales (figura 3).

La solución del problema estaba entonces en diseñar una red de drenaje compuesta de pozos y perforaciones inclinadas que captaran las aguas de infiltración interceptando de esta manera el flujo descendente e impidiendo la saturación. El sistema de drenaje fue diseñado y construido.

Sin embargo, no podía descartarse la posibilidad de que existiera flujo subterráneo proveniente de la roca adyacente; en tal caso el sistema de drenaje construido no sería efectivo ya que solamente captaría las aguas lluvias infiltradas directamente

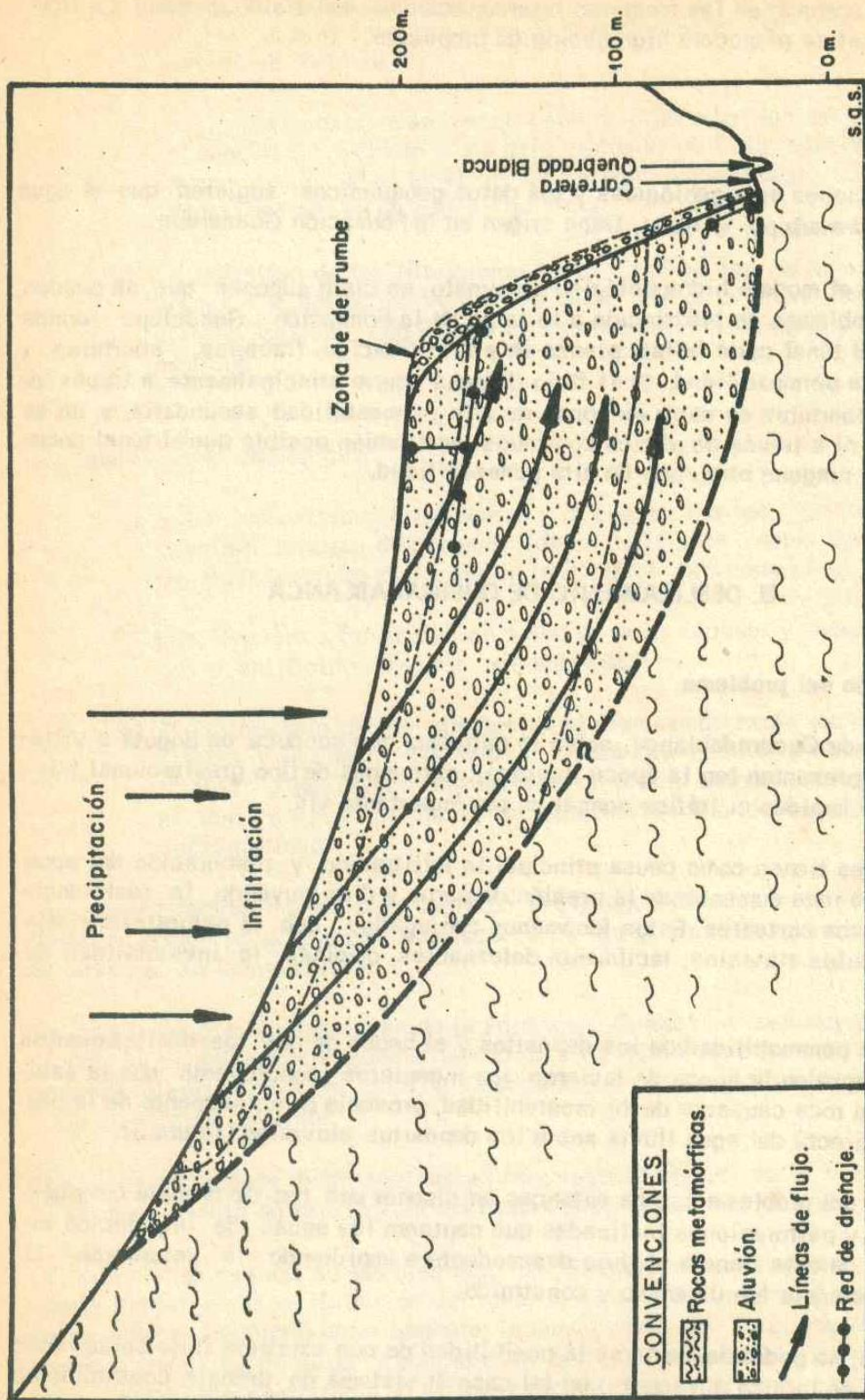


FIGURA No.3.— MODELO ESQUEMATICO DEL REGIMEN HIDROGEOLOGICO, FORMULADO ANTES DEL ESTUDIO HIDROGEOQUIMICO.

sobre el aluvión. Consciente de la situación la compañía de ingenieros encargada del mantenimiento de la vía solicitó al Instituto de Asuntos Nucleares, un estudio tendiente a identificar el origen y la trayectoria del agua que emerge de la base de los depósitos aluviales. El estudio fue enfocado desde el punto de vista geoquímico y el informe correspondiente fue rendido el 7 de junio de 1974, varias semanas antes de la tragedia ocurrida en Quebradablanca.

Geología

El área está compuesta por esquistos cloríticos, filitas, pizarras y metaareniscas que integran los denominados Esquistos de Quetame. Discordantes sobre este grupo de rocas que se hallan fuertemente plegadas y fracturadas, yace un depósito aluvial de más de 200 m. de espesor, compuesto por bloques, fragmentos de varios tamaños y gravas en una matriz de arenas y arcillas con baja o ninguna cementación. En algunas partes del depósito aluvial se observa una clara estratificación formada por la intercalación de capas de arena, arcillas y limos.

Técnicas utilizadas

Dadas las características geológicas e hidrológicas del área, se optó por hacer un estudio hidrogeoquímico antes de iniciar cualquier programa de inyección de trazadores. Para ello se tomaron muestras de agua representativas de: a) La lluvia ocurrida a una altura superior a la de la meseta formada por los depósitos aluviales. (muestras No. 1, 8 y 10). b) De los diferentes sistemas de drenajes localizados en la parte alta (muestra No. 2, Figura 3). c) De la base de los depósitos aluviales. (muestras No. 3, 4, 5, 6, 7 y 9, Figuras 3 y 4). Se hicieron análisis químicos convencionales y de isótopos pesados (Oxígeno-18 y Deuterio).

a) Análisis químicos

Los resultados de los análisis químicos se muestran en forma diagramática en la figura 5. Las muestras 1 y 8 tomadas como aguas drenadas de los esquistos y demás rocas adyacentes al aluvión (con una componente de la precipitación aguas arriba de la zona de estudio), muestran características diferentes lo cual de por sí sólo dificulta la interpretación cuando se correlaciona con las muestras del aluvión. Pueden identificarse tres grupos de aguas:

- 1) Aguas caracterizadas por contenido de carbonato de calcio. (muestras 5, 7 y 8).
- 2) Aguas caracterizadas por carbonatos de magnesio (1, 2, 4 y 6).
- 3) Aguas caracterizadas por su contenido de sodio (3).

La muestra No. 2 (tomada del pozo colector No. 3), se caracteriza por su carbona-

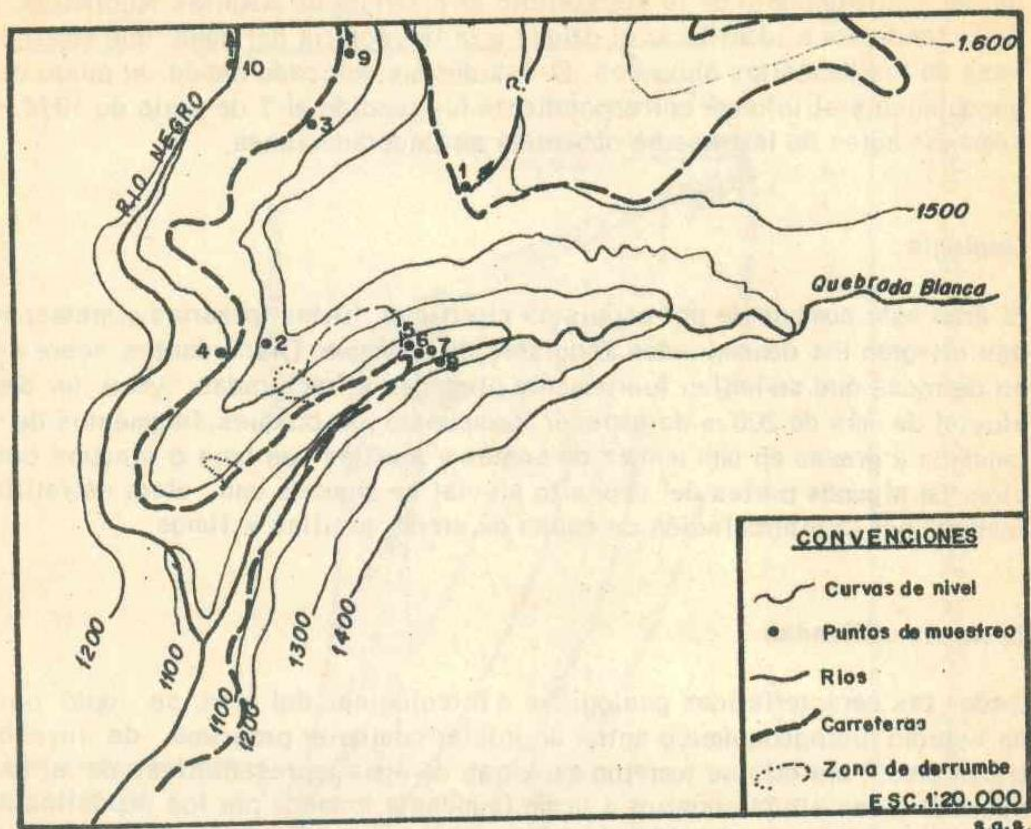


FIGURA No. 4. — AREA DE QUEBRADA BLANCA. PUNTOS DE MUESTREO.

to de calcio y potasio. Los análisis no permiten inferir en este caso si el agua tiene su origen en los esquistos o en el aluvión, ya que la muestra No. 4 tomada como representativa de la terraza es también químicamente muy similar. De otra parte, la muestra No. 3 que puede considerarse como representativa del depósito aluvial, es completamente diferente a las tres anteriores (1, 2 y 4). Esto hace suponer que ha fluido a través de estratos de diferentes características mineralógicas.

Las muestras 5 y 7 tomadas de los drenes (S7 y S8 respectivamente), se presentan químicamente diferentes a la muestra 6 (dren S2), aunque esta última fue tomada en un punto intermedio entre los dos. Ello también puede indicar que ha fluido a través de un medio diferente.

Lo más importante que puede inferirse de los análisis químicos y de las obser-

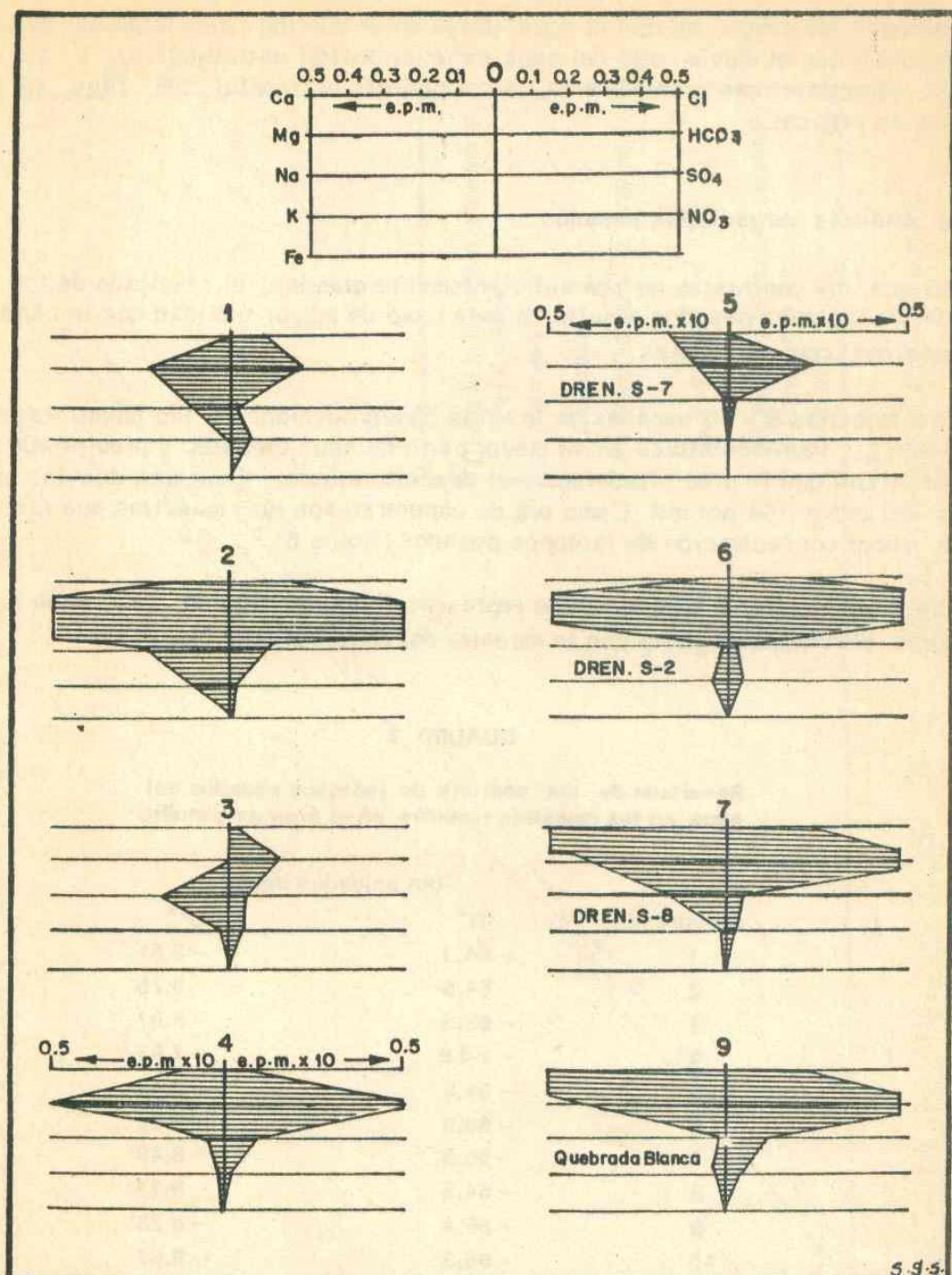


FIGURA No.5.— REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL RESULTADO DE LOS ANALISIS QUIMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA.

vaciones de campo, es que el agua fluye en el aluvión a lo largo de las capas, es decir que el movimiento del agua tiene un control estratigráfico y que dadas las características estructurales, la componente horizontal del flujo es mayor que la vertical.

b) Análisis de isótopos pesados

Aunque los contrastes no son suficientemente grandes, el resultado de los análisis de isótopos pesados resultó en este caso de mayor utilidad que los análisis químicos convencionales.

Las muestras 8 y 10 tomadas de los ríos (Quebradablanca y Río Negro respectivamente), y representativas en su mayor parte de agua drenada y precipitada a mayor altura que la precipitada sobre el depósito aluvial, tiene una desviación delta del orden -64 por mil. Como era de esperarse son las muestras que presentan la menor concentración de isótopos pesados (figura 6).

Las muestras 3 y 4 tomadas como representativas del aluvión, presentan las menores desviaciones junto con la muestra del pozo colector No. 3.

CUADRO 2

Resultado de los análisis de isótopos pesados del agua en las muestras tomadas en el área de estudio

Muestra No.	(en unidades delta)	
	H ²	O ¹⁸
1	- 54,3	- 8,51
2	- 54,6	- 8,25
3	- 52,5	- 8,07
4	- 50,6	- 7,63
5	- 55,6	- 8,43
6	- 58,9	- 8,62
7	- 56,8	- 8,49
8	- 64,5	- 9,37
9	- 56,4	- 8,23
10	- 65,3	- 9,57

Análisis hechos por el Institute Fur Radiohydrometrie Munich.

Las muestras 5, 6 y 7 tomadas de los drenes, tienen una composición isotópica comprendida entre los valores de las muestras 1 y 8 (figura 6), lo cual indica que es agua de precipitación ocurrida sobre un área a una altura mayor que la de depósito aluvial. Esto permite establecer que esta agua proviene de los esquistos

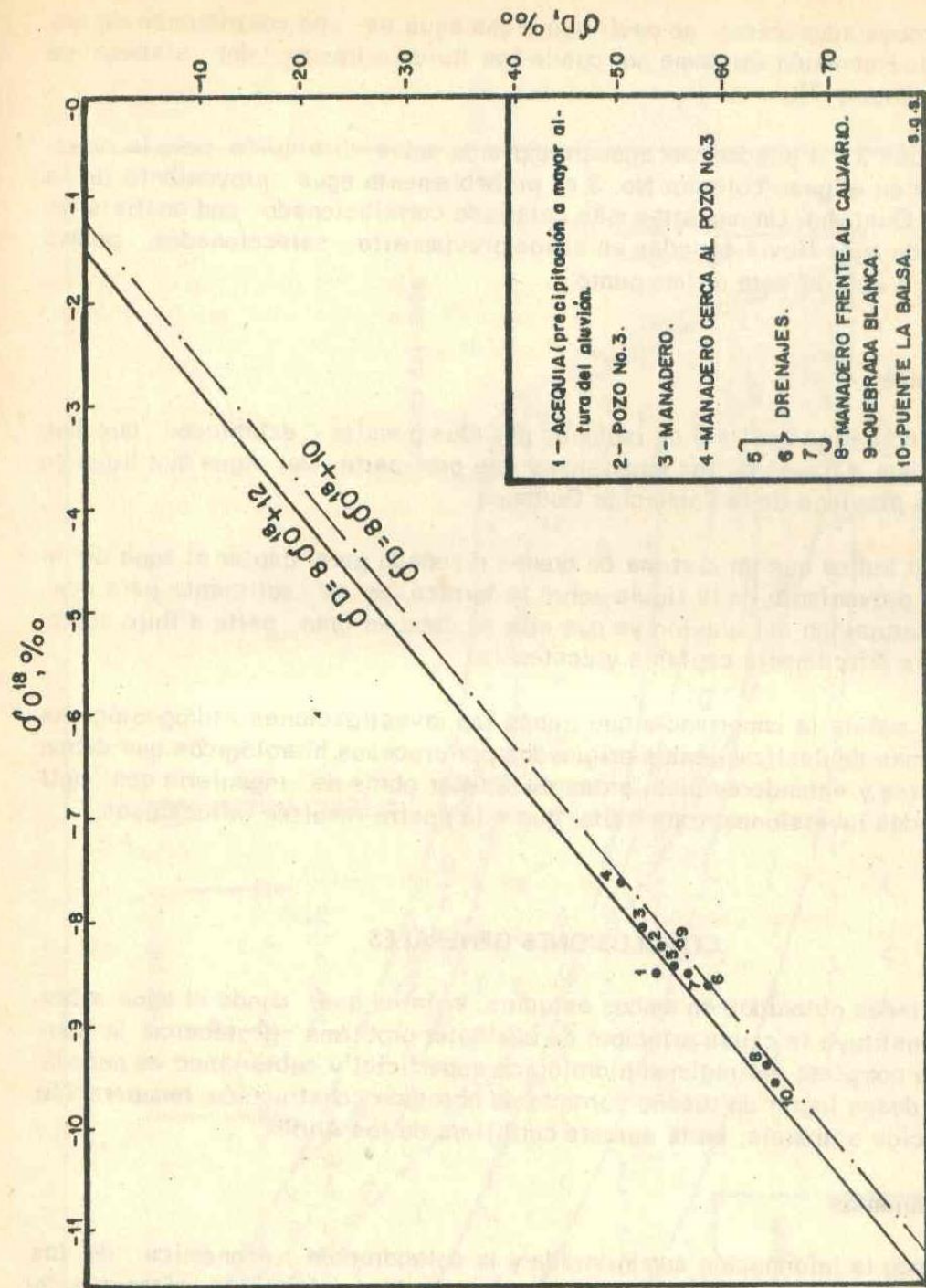


FIGURA No. 6. -- ANALISIS DE ISOTOPOS ESTABLES EN QUEBRADA BLANCA.

y, demás rocas adyacentes, es decir que dicha agua es una contribución de las rocas de la Formación Quetame por donde han fluido a través del sistema de fracturas, (figura 7).

Las muestras 3 y 4 pueden ser agua precipitada sobre el aluvión, pero la muestra tomada en el pozo colector No. 3 es probablemente agua proveniente de la Formación Quetame. Un muestreo más detallado correlacionado con análisis de muestras de agua lluvia tomadas en sitios previamente seleccionados, podría contribuir a aclarar este último punto.

Conclusiones

El resultado de los análisis de isótopos pesados permite establecer que hay flujo de agua a través de los esquistos y que gran parte del agua que fluye en el aluvión proviene de la Formación Quetame.

Este hecho indica que un sistema de drenes diseñado para captar el agua de infiltración proveniente de la lluvia sobre la terraza, no es suficiente para controlar la saturación del aluvión ya que ella se debe en gran parte a flujo subterráneo más difícilmente captable y costoso.

El trabajo señala la importancia que tienen las investigaciones hidrogeológicas en problemas de deslizamientos originados por procesos hidrológicos que deben identificarse y entenderse bien, antes de diseñar obras de ingeniería que impliquen grandes inversiones, para evitar que a la postre resulten infructuosas.

CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados obtenidos en ambos estudios, señalan que donde el agua subterránea constituye la causa principal de cualquier problema geotécnico, la identificación completa del régimen hidrológico superficial y subterráneo es necesaria si se desea lograr un diseño correcto de obras de construcción, recuperación, conservación o drenaje, en la agreste cordillera de los Andes.

Reconocimientos

Se agradece la información suministrada y la colaboración económica de las compañías Ingetec Ltda., y Gama Ingenieros Ltda. Los análisis de isótopos estables fueron hechos por el Institute Fur Radiohydrometrie en Munich.

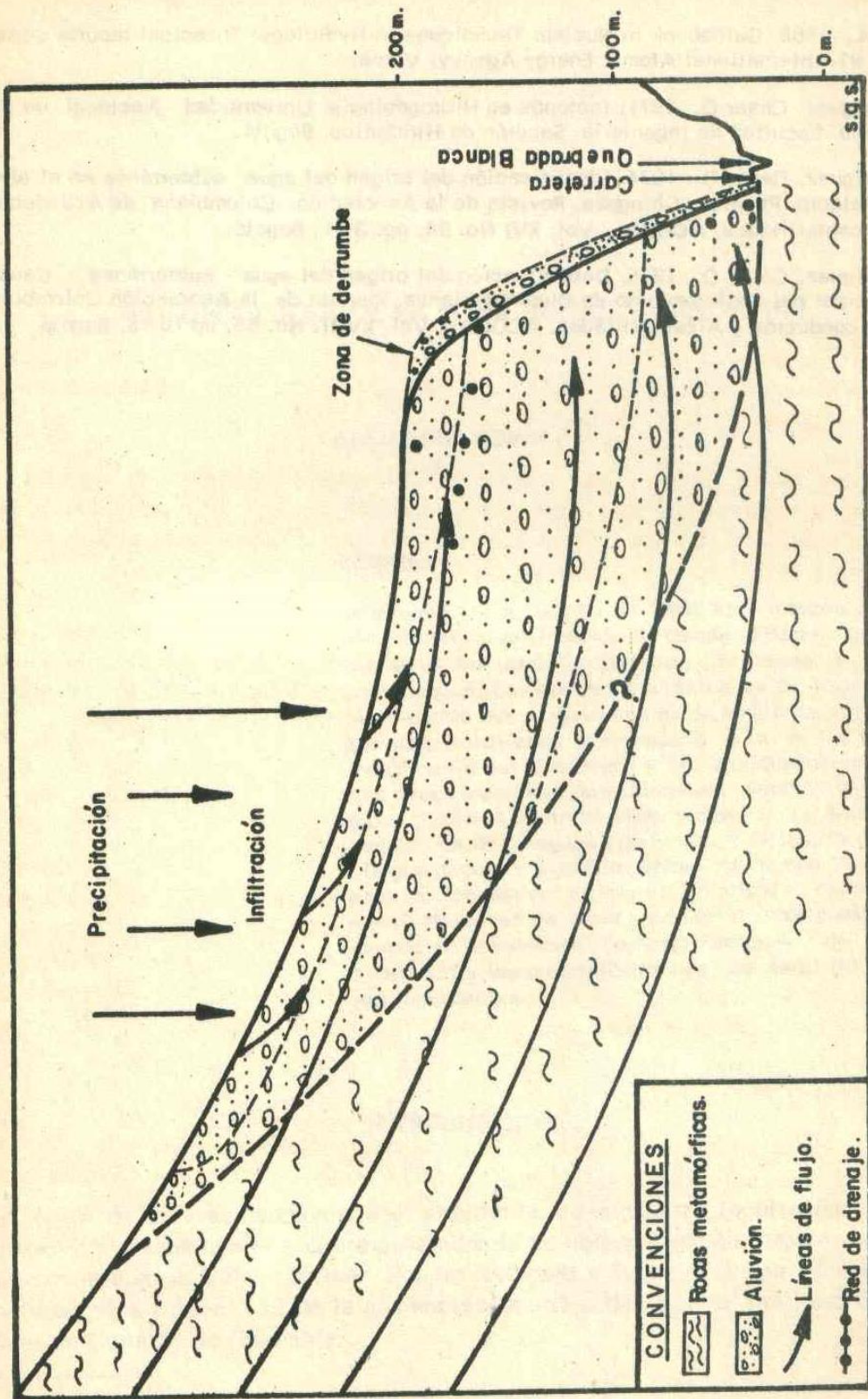


FIGURA No. 7. — MODELO ESQUEMATICO DEL REGIMEN HIDROGEOLOGICO FORMULADO DESPUES DEL ESTUDIO HIDROGEOQUIMICO.

REFERENCIAS

- (1) IAEA, 1968. Guidebook in Nuclear Techniques in Hydrology. Technical reports series No. 91. International Atomic Energy Agency, Viena.
- (2) Rodríguez, César O., 1971. Isótopos en Hidrogeología. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Sección de Hidráulica, Bogotá.
- (3) Rodríguez, César O., 1974. Identificación del origen del agua subterránea en el túnel de Palacio. Proyecto Chingaza. Revista de la Asociación Colombiana de Acueductos y Alcantarillados, ACODAL. Vol. XVI No. 64, pp. 3-11, Bogotá.
- (4) Rodríguez, César O., 1975. Determinación del origen del agua subterránea. Causa principal del deslizamiento de Quebradablanca. Revista de la Asociación Colombiana de Acueductos y Alcantarillados, ACODAL. Vol. XVIII. No. 65, pp 10-18, Bogotá.

