



UN MODELO DE DEPOSITACION DE URANIO EN LA CUENCA DE
ALGARROBAL, VALLENAR, CHILE.

Eduardo Abad E.

Departamento de Geociencias,
Universidad de Concepción.

R E S U M E N

La cuenca estructural terciaria de la región de Algarrobal, presenta un relleno aluvional cuaternario conformando capas sedimentarias dispuestas en forma anárquica tanto en desarrollo vertical como horizontal. El basamento está constituido por volcanitas neocomianas (formación Bandurrias) y rocas hipabisales asociadas, intruídas por granodioritas cretácicas.

Se efectuó una revisión geológica-radiométrica del marco de la cuenca complementado por un muestreo orientativo de rocas y suelos, hidrogeoquímica estratégica y perfilaje gama de algunos pozos de sondajes.

El muestreo de aguas fue realizado tanto en la cuenca como en la parte principal de la red de drenaje tributario. Los perfiles gama se ejecutaron en sondajes del yacimiento de hierro Boquerón-Chañar.

La cuenca presenta las características necesarias para la depositación de uranio, relacionada directamente con las aguas subterráneas que serían el medio de movilización. Tanto ellas como los sedimentos, muestran la existencia de uranio. La fuente de este elemento estaría en los sedimentos de la cuenca y en un aporte efectuado a través de la Quebrada Algarrobal, originado en las rocas graníticas y riolíticas de la formación Hornitos.

El análisis de la información permite determinar cinco parámetros esenciales para la depositación de uranio en una cuenca continental.

A B S T R A C T

The tertiary tectonic basin of the Algarrobal region is filled by quaternary alluvial deposits, like sedimentary beds disposed without any vertical or horizontal ordering. This sediments lies over a basement composed by lower cretacic volcanic rocks (Bandurrias formation) and related hipabisal rocks, intruded by cretacic granodiorites.

A radiometric-geologic reconnaissance of the basin and boundary rocks was made. Orientative sampling of soils and rocks, hidrogeochemistry and gamma profiling was made for detecting uranium and related elements anomalies. The water sampling was carried on the basin and on the main tributary drainage. The gamma profiling was made on some drillholes of the Boquerón-Chañar iron ore deposit.

The basin have the necessary characteristics for the uranium deposition, directly related with underground waters that could be the mobilizing agent. The sediments, as the waters, shows the presence of uranium. The source of this element would be the basin sediments and the granitic and riolitic rocks from the Hornitos formation.

Five paraments are defined, that has been though esencial for the uranium deposition on an continental basin.

1. INTRODUCCION

La Depresión Central de Chile está representada en el norte del país, por numerosas cuencas estructurales formadas durante el Terciario Superior y Pleistoceno por tectónicas distensivas, acompañadas de volcanismo ácido producido en el dominio cordillerano actual de Los Andes. Las unidades geológicas resultantes caracterizan principalmente el Piso Estructural Andino responsable del alzamiento de la Cadena Andina en el Terciario Superior. Estas cuencas tectónicas conforman fosas de sedimentación continental, que reciben las quebradas principales de los sistemas de drenaje de la precordillera, depositándose en ellas gran parte del producto de la erosión de las rocas que la constituyen. Del mismo modo estas quebradas son los conductos de recarga de aguas subterráneas, que en algunas de estas fosas tienen mucha importancia por las actividades vitales que se desarrollan en torno a ellas.

Las características generales de estas cuencas indujo a un estudio preliminar bajo aspectos de favorabiliu

dad para la depositación de uranio, que fue ejecutado por la Comisión Chilena de Energía Nuclear, dentro de su programa de exploración, tomando una de ellas a modo de ejemplo. Se eligió la Cuenca de Algarrobal por su ubicación e información geológica pre-existente aprovechable.

Los resultados del estudio han motivado la proposición de un esquema de depositación de uranio, que puede constituir un modelo de importancia dentro del contexto de la geología del uranio en nuestro país, considerando las amplias proyecciones que tiene hacia las numerosas fosas similares existentes.

2. CARACTERIZACION DE LA CUENCA DE ALGARROBAL

La "cuenca estructural de Algarrobal" (Cuenca de Algarrobal), está ubicada al norte de la ciudad de Valledupar a 40 kms por la carretera Panamericana (fig. 1). Representa un jalón de la Depresión Central de Chile y comprende varios llanos que en conjunto se ha denominado LLano de Algarrobal (Abad, 1976a), revelando la separación entre las cordillera de la Costa y de los Andes.

Los límites morfológicos están dados por los primeros cerros de la Precordillera de los Andes al este y el cordón que da inicio a la Cordillera de la Costa al oeste. Al Norte y Sur se encuentra cadenas transversales de cerros de poca altura.

El LLano de Algarrobal está constituido por el material aluvial que rellena la cuenca, cubierto por sedimentos eólicos. Su forma es sub-rectangular, orientada

hacia el NE; tiene una superficie de 600 Km² aproximadamente y presenta una topografía más o menos regular, sin accidentes de importancia (fig. 1).

Esta región, Algarrobal, es parte de una hoya hidrográfica que se ha denominado Cuenca Totoral-Algarrobal (Falcón y Sánchez, 1972; Bravo, 1978), localizada entre la divisoria sur-occidental de la hoya del río Copiapó y la divisoria nor-occidental de la hoya del río Huasco. Esta cuenca está dividida en 2 por el cordón de rocas impermeables que comprende la Sierra Pajaritos y el Cerro El Paico (fig. 1), determinándose al sur la subcuenca de Algarrobal, denominada aquí "Cuenca de Algarrobal", constituyendo la más amplia y de mayor importancia hidrológica (Bravo, 1978).

En el cuadrante nor-occidental del Llano, y cercano al borde correspondiente, se encuentra el yacimiento de hierro Boquerón-Chañar asociado a rocas volcánicas que forman parte del basamento de la Cuenca de Algarrobal. Los servicios geológicos, geofísicos y de sondajes efectuados durante la exploración de este yacimiento, tuvieron mucha importancia en la obtención de datos sobre el material aluvial de relleno de la cuenca, las rocas del basamento y su paleotopografía.

La hoya hidrográfica de la quebrada Algarrobal, es responsable del drenaje de la zona precordillerana de donde proviene la mayor parte de los sedimentos que rellenan la cuenca, constituyendo, esta quebrada, la principal tributaria por donde se produce la recarga de agua subterránea y fluyen los aluviones provenientes de los sectores

Fig. 1 GEOLOGIA Y MARCO GEOLOGICO DE LA REGION DE ALGARROBAL
VALLENAR, III REGION, ATACAMA

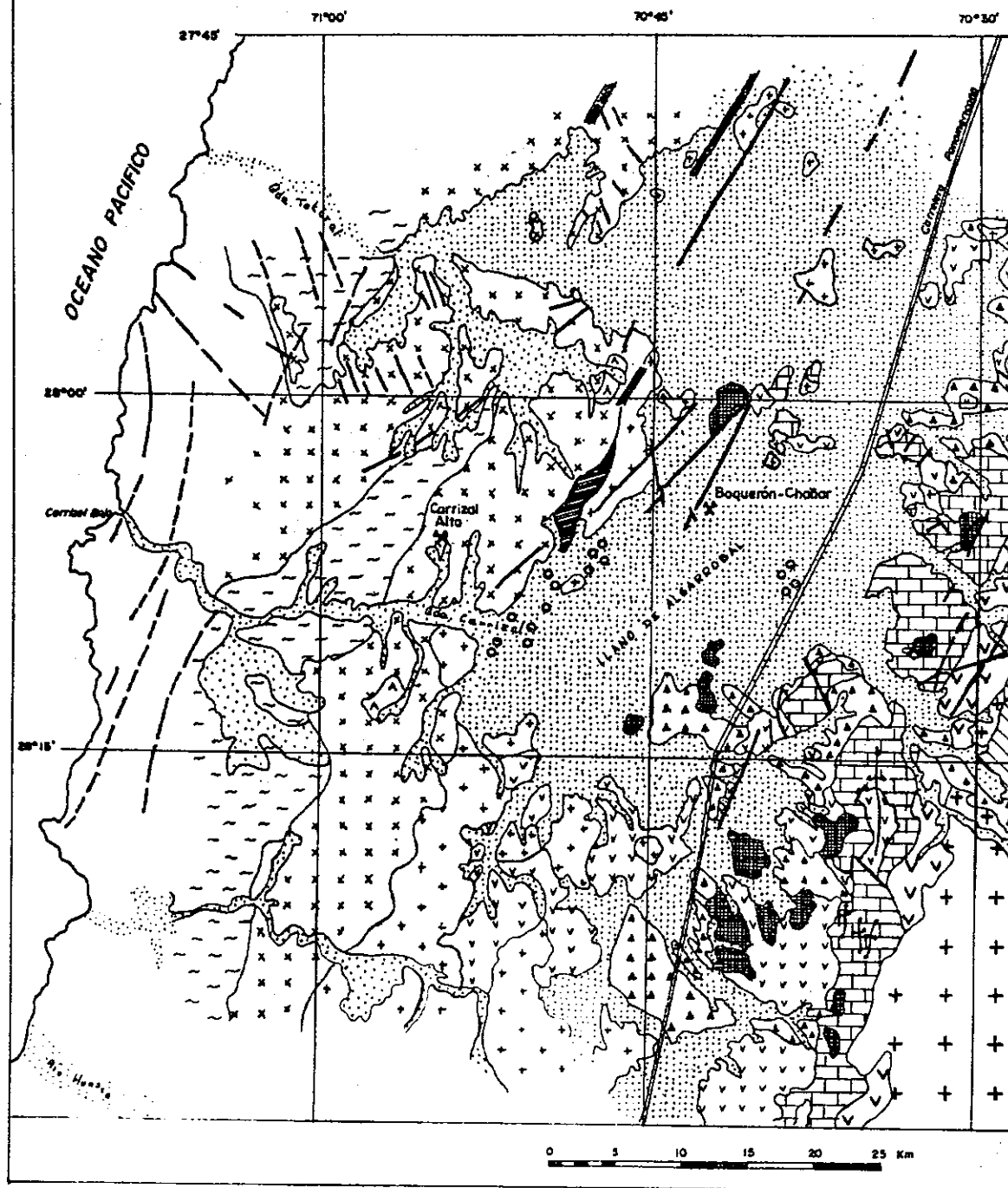
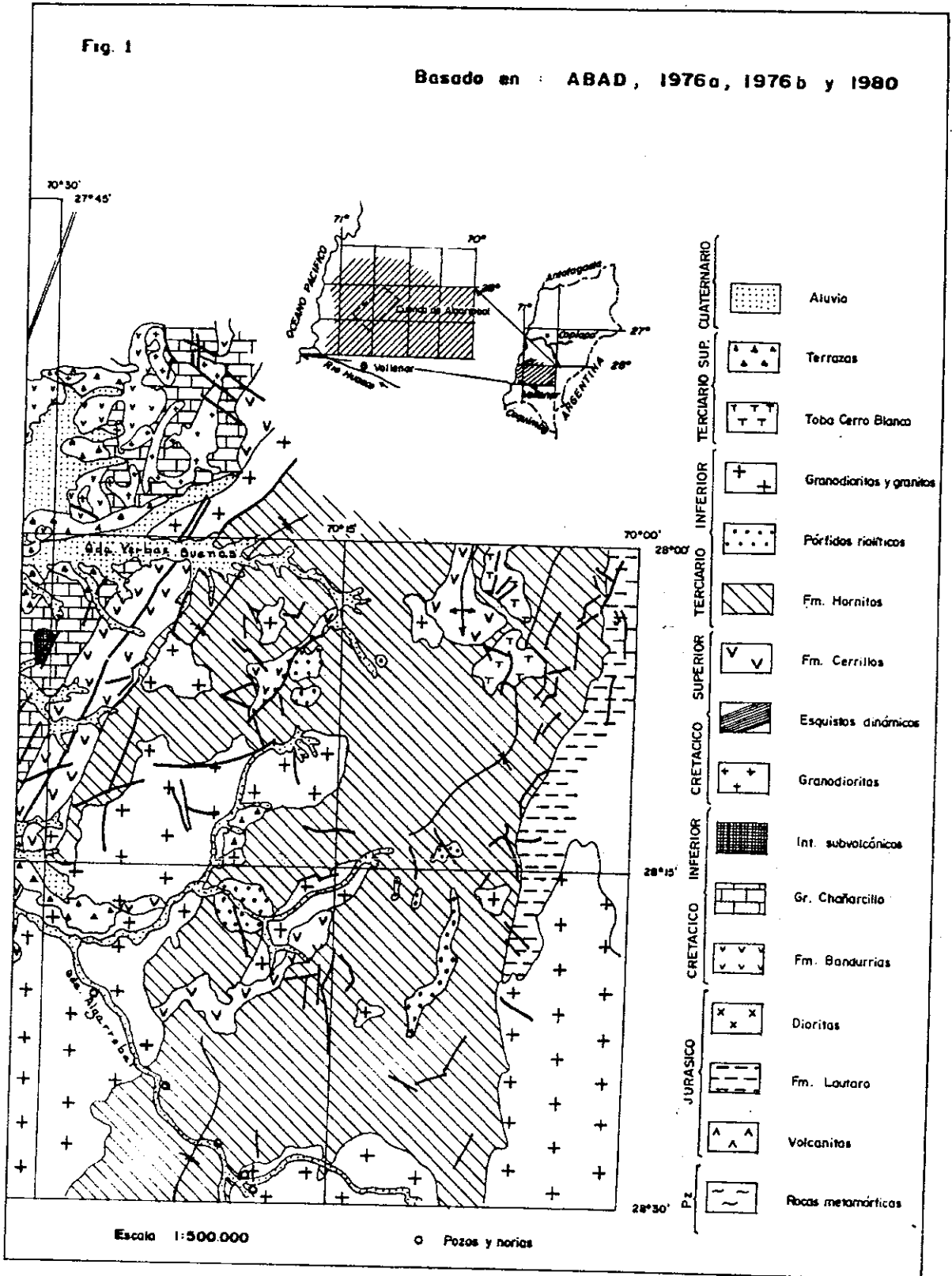


Fig. 1

Basado en : ABAD , 1976a, 1976b y 1980



altos de la Precordillera en épocas de lluvias, que son muy esporádicas (fig. 1).

3. GEOLOGIA REGIONAL Y MARCO GEOLOGICO DE LA CUENCA

En una sección transversal central de la III Región de Atacama, se distinguen los terrenos pre-andinos de edad paleozoica y triásica superior y los terrenos del ciclo andino de edad jurásica a terciaria. Los terrenos post-andinos están representados por terrazas del Mioceno Superior-Plioceno y aluvio cuaternario.

Las rocas estratificadas paleozoicas afloran en la Cordillera de la Costa y corresponden a una secuencia de sedimentitas metamórficas muy plegadas, intruídas por granitos paleozoicos que afloran en la parte norte de la Región de Atacama y dioritas jurásicas en la parte central y sur (fig. 1). Los granitos paleozoicos también afloran en la Alta Cordillera de los Andes. Las rocas triásicas corresponden a una secuencia de lavas andesíticas y sedimentitas continentales conocidas como formación La Ternera (Brüggen, 1950), que afloran en la Cordillera de los Andes.

Las rocas estratificadas del Ciclo Andino afloran en la Precordillera (fig. 1) caracterizando el desarrollo del Geolimar Andino y están constituidas por:

- a) Formación Lautaro (Segerstrom, 1959) de edad triásica a bajociana, constituida por una sucesión de rocas calcáreas marinas, que presentan gradación a continentales, sedimentarias y volcánicas, hacia la parte superior mos-

trando un perfil regresivo (Segerstrom, 1959 y 1968; Abad, 1976; Jensen, 1976).

b) Grupo Chañarcillo (Segerstrom y Parker, 1959; Segerstrom y Ruiz, 1962), corresponde a una serie sedimentaria calcárea de edad neocomiana. En la región de Algarrobal presenta una potencia de 3000 m integrado por las formaciones Abundancia-Nantoco, Totoralillo y Pabellón (Biese, 1942; Corvalán, 1974; Abad, 1976a).. Estas rocas constituyen, principalmente, los primeros cerros de la Precordillera que conforma el borde oriental del Llano de Algarrobal.

c) Formación Bandurrias (Segerstrom, 1960), representa las facies continentales del Neocomiano. En la región de Algarrobal está constituida por 1.200 m de rocas clásticas, tobas y riolitas en la base y tobas brechosas hacia la parte superior intercaladas con calizas.

Esta formación presenta una relación de engrane hacia el este con las rocas del grupo Chañarcillo y es la principal constituyente de las cadenas de cerros que conforman los bordes norte y sur del Llano de Algarrobal.

d) Formación Cerrilos (Segerstrom y Parker, 1959) constituido por sedimentos continentales y lavas andesíticas del Cretácico Superior (Abad, 1976a), que cubren discordantemente la formación Lautaro y el grupo Chañarcillo.

- e) Formación Hornitos (Segerstrom, 1959), constituida por riolitas en la parte inferior y hacia la superior andesitas, con intercalaciones de tobas, algunas ignimbríticas, y ocasionalmente sedimentitas lacustres. La edad asignada a estas rocas es paleocena superior-eocena inferior (Abad, 1976a). Cubre discordantemente la formación Cerrillos y en algunas partes directamente a la formación Lautaro.

Esta formación es la que ocupa el área mayor de la Precordillera en la región de Algarrobal.

- f) Las rocas del Terciario Superior corresponden a tobas riolíticas que han sido denominadas formación Cerro de la Peineta (Mortimer, 1969; Zentilli, 1974) y Toba Cerro Blanco (Abad, 1976a), que son correlacionables a la formación Negro Francisco (Segerstrom, 1968), que aflora en la Alta Cordillera de los Andes, constituida por lavas riolíticas y andesíticas.

Las rocas intrusivas principales se integran en 3 complejos de gran importancia en la región de Algarrobal.

- a) Complejo diorítico del Jurásico; constituido por tonalitas, dioritas y gabros que presentan un importante desarrollo areal en la Cordillera de la Costa (fig. 1). Intruye las rocas metamórficas paleozoicas y presenta algunos roof pendants de metandesitas, también atribuidas al Jurásico (Moraga y otros, 1969).

Las rocas de este complejo están cortadas por filones diabásicos que se orientan según dos direcciones principales: N a NNW y NE a ENE. Las vetas polimetálicas, con uranio, de Carrizal Alto, que se encuentra en estas rocas, siguen la estructura del segundo sistema y coinciden con filones en muchas localidades.

- b) Complejo granodiorítico del Cretácico; constituido por granodioritas, tonalitas, leucogranodioritas y diferenciaciones aplíticas y graníticas (Moraga y otros, 1969; Abad, 1976a). Intruye el complejo del Jurásico y las rocas estratificadas del Neocomiano hacia el este. Datasiones radiométricas de estas rocas arrojaron entre 95 y 106 millones de años, que las ubican en el Cretácico Superior bajo (Farrar y otros, 1970; Abad, 1976b).

Entre los dos complejos intrusivos se ha determinado una zona de esquistos producidos por metamorfismo dinámico, que se extiende en el faldeo occidental del cerro Chañar (Moraga y otros, 1969; Abad, 1976b).

Este complejo cretácico conforma, fundamentalmente, el borde occidental del Llano de Algarrobal.

- c) Complejo granítico del Terciario; constituido por granodioritas, monzonitas cuarcíferas y granitos correspondientes a dos fases intrusivas, una del Paleoceno y otra del Eoceno Superior (Abad, 1976a). Intruyen las formaciones Cerrillos y Hornitos correspondientemente (fig. 1).

La formación Hornitos se encuentra intruída por numerosos cuerpos menores de pórfidos riolíticos rojos y grises, que se han relacionado al sistema de efusión de las volcanitas de la misma formación Hornitos (Abad, 1976a).

La cuenca estructural de Algarrobal se encuentra en el dominio de las rocas de la formación Bandurrias y su engrane con las formaciones basales del grupo Chañarcillo, que presentan una estructura general de rumbo NNE que es común para los afloramientos de todas las unidades geológicas de la región. Hacia el sur de la cuenca, las volcanitas de Bandurrias presentan sectores de alteración hidrotermal donde las rocas aparecen totalmente silicificadas, con colores muy claros. Se encuentra además queratófiros y tobas de aspecto soldado (Muñoz-Cristi, 1958).

Es importante señalar, que entre las volcanitas de Bandurrias se encuentran sectores con mineralización de apatita de alto significado (Abad, 1976a).

Hacia el norte la cuenca está limitada por el cordón formado por la Sierra Pajaritos y el cerro El Paico, que la separa de la cuenca estructural de la Estancia Castilla (fig. 1). Este cordón está constituido en general por el engrane de rocas continentales de la formación Bandurrias y la formación Nantoco, hacia el este (Moraga y otros, 1969; Abad, 1976a). La Sierra Pajaritos, específicamente, corresponde a volcanitas andesíticas, en las cuales no se observa estratificación, cruzadas por filones irregulares de microdiorita, andesita y pórfidos dioríticos. Estas rocas se han correlacionado con las perforadas en Boquerón-Chañar y se consideran hipabisales relacio-

nadas a centros efusivos causantes del volcanismo que dio origen a las volcanitas de la formación Bandurrias (Moraga y otros, 1969; Abad, 1976a).

4. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA DE LA CUENCA

4.1. Geología de la cuenca

El Llano de Algarrobal se encuentra limitado en sus bordes occidental y oriental por grandes fallas de dirección NNE-SSW, que se insinúan principalmente en el aluvio determinando en muchos casos líneas de colinas y elevaciones topográficas causadas por el movimiento de ellas. El drenaje y erosión pone de relieve su existencia en las partes inferiores de la serie sedimentaria neocomiana, que constituye los cerros del borde oriental. Las fallas del borde oeste tienen descenso relativo de los bloques orientales y las del borde este, de los occidentales (Abad, 1976a). Mortimer (1969) determinó estas fallas al noroeste del yacimiento de Boquerón-Chañar y al oeste y suroeste del cerro Jaula, sugiriendo que serían las causantes de la formación de la Cuenca de Algarrobal, activas durante el Cenozoico y probablemente hasta hoy. Esta idea fue esbozada anteriormente por Taylor (1947) y recogida en el estudio geológico de la región por Abad (1976a y 1980).

Como resultado de movimientos tectónicos iniciados en el Terciario, se produjo la fosa que cortó la red de drenaje entonces existente. Esta fosa comenzó a rellenarse a comienzos del Plioceno con materiales detríti-

cos erosionados por las quebradas afluentes a la depresión, formándose extensos conos aluviales que, a medida que progresó el proceso aluvional, se extendieron por toda la cubeta de sedimentación (Taylor, 1947; Espíldora y Karzulovic, 1969). Este proceso de relleno de la cuenca ha sufrido variaciones producidas por subsidencia y sollevamientos continentales distinguiéndose, por lo menos, tres etapas de sedimentación (Taylor, 1947; Abad, 1976a), que ocurrieron principalmente en el Pleistoceno y Reciente; la última presumiblemente aún continúa en nuestros días.

La base de la cuenca tiene una topografía subterránea determinada por quebradas, cubetas y portezuelos; hay cumbres rocosas que a veces sobresalen destacándose en el paisaje como cerros islas, (Moraga y otros, 1969; López, N., 1970; Vergara, L., 1973; Abad, 1976 a; Bravo, 1978).

Las rocas que constituyen el basamento de la cuenca corresponde a volcanitas de la formación Bandurrias y sedimentitas calcáreas de la formación Abundancia-Nantoco, subordinadas, producto del engrane de estas dos formaciones. Entre las volcanitas hay rocas hipabisales correspondientes a andesitas porfíricas, microdioritas y pórfidos dioríticos cuarcíferos, silicificadas la mayor parte, como las encontradas en Boquerón-Chañar (Moraga y otros, 1969). En general la roca es compacta y poco alterada presentando en algunos lugares profusión de guías de calcita, actinolita, apatita, epidota y escapolita, en orden de importancia. Se encuentra también rocas del complejo intrusivo granodiorítico intruyendo las anteriores.

La mineralización de hierro de Boquerón-Chañar (Moraga y otros, 1969) se encuentra asociada a las andesitas y rocas hipabisales del basamento, constituida principalmente por magnetita. Hay una importante zona de oxidación en estas rocas, que alcanza una potencia media de 30 m y una máxima de 100 m, distinguiéndose por una importante martitización y presencia de hematita. Se distingue también alteración causada por aguas supérgenas, que han penetrado por fracturas hasta profundidades importantes causando limonitización en varios niveles.

El relleno aluvial de la cuenca tiene un espesor variable debido a la irregularidad de la topografía subterránea. En Boquerón-Chañar los sondajes mostraron variaciones de 140 m a 330 m y los perfiles geoelectricos realizados en el sector sur-occidental del llano (Bravo, 1978), determinaron potencias de sedimento de 170 m a 620 m.

El conjunto del relleno sedimentario deriva fundamentalmente de aluviones o corrientes de barro cuyos depósitos se caracterizan por estar constituidos de una mezcla de gravas, a menudo con bloques o bolones de gran tamaño, y con abundante porcentaje de arenas, limos y arcillas, donde el cemento calcáreo alcanza importancia en algunos niveles. Es posible encontrar intercalaciones permeables en la ubicación de antiguos cauces, que alguna vez posibilitaron el escurrimiento de aguas superficiales, y, del mismo modo, se encuentran intercalaciones impermeables con predominio de limos y arcillas depositados en sectores marginales a dichos cauces, donde a menudo las grandes crecidas de aguas permitieron el emplazamiento de lagunas temporales, (Espíldora y Karzulovic, 1969).

Frente al nacimiento de la Quebrada Carrizal, en el sector sur-occidental del llano, se encuentra una cubierta calcárea dura (Bravo, 1978) que aflora esporádicamente bajo una fina capa de arena eólica. Esta roca seguramente está formada por material químico de aguas subterráneas que ascienden por capilaridad al chocar contra el borde occidental de la cuenca. Estos depósitos pueden corresponder al concepto de calcretas lo que las hace sumamente interesantes.

En el relleno de la cuenca no existe una disposición uniforme de capas sedimentarias encontrándose todos los tipos de sedimentos, que comprenden tobas compactas y zonas calcáreas, en forma anárquica tanto en desarrollo horizontal como vertical. En los sedimentos basales se pueden encontrar zonas brechosas o conglomerádicas, cuando corresponde a relleno de paleoquebradas, y las rocas de basamento pueden presentar importantes zonas de meteorización y fracturamiento.

4.2. Hidrogeología de la cuenca

Por los antecedentes geológicos se concluye, que la Cuenca de Algarrobal constituye un embalse subterráneo con importantes acuíferos, en el relleno, y reservorios determinados por la irregularidad topográfica del basamento (Espíldora y Karzulovic, 1969; Falcón y Sánchez, 1972).

La fuente de recarga de agua subterránea son las precipitaciones pluviales y nivales producidas en la parte alta de la precordillera en el borde oriental de la cuenca, principalmente en la zona drenada por la Quebrada Algarro-

bal (Bravo, 1978). Las aguas de la cuenca escurren hacia el poniente y son represadas por las rocas impermeables de la Cordillera de la Costa, escurriendo en definitiva hacia las quebradas Totoral y Carrizal, siendo esta última la más importante (Bravo, 1978), donde se encuentran próximas a la superficie. En estas zonas el agua asciende por acción capilar, aflorando y perdiéndose por procesos de evapotranspiración, originando zonas de vegas y cañaverales (Falcón y Sánchez, 1972; Bravo, 1978). Carrizal también recibe las líneas de flujo de las quebradas que vienen desde el sur-este.

Mediante servicios de sondaje, se ha determinado dos zonas acuíferas principales en la cuenca. La primera está localizada entre 30 m y 50 m de profundidad en la parte oriental de llano, mientras hacia la zona occidental, se ubica a menos de 25 m (Espíldora y Karzulovic, 1969; Vergara, 1973) y muy próxima a la superficie en el borde oeste. Frente al nacimiento de la quebrada Carrizal hay una unidad sedimentaria no consolidada, casi superficial, saturada de agua, que tiene una potencia variable entre 20 m y 80 m (Bravo, 1978). La segunda zona acuífera estaría bajo los 80 m que mantendría una cierta presión de confinamiento, distribución errática, descarga poco expedita, recarga eventual y una proporción importante de aguas embalsadas subterráneamente (Espíldora y Karzulovic, 1969). En Boquerón-Chañar, aparte de la napa de los 80 m, se determinó una tercera a 150 m aproximadamente, limitada al desarrollo de una paleoquebrada (Vergara, 1973).

La zona acuífera superior determina la existencia de varias norias en el Llano de Algarrobal y el agua casi superficial del borde occidental de la cuenca da lugar a una extensa zona de aguadas y vertientes, que son aprovechadas para usos domésticos y para el riego de pequeños terrenos agrícolas en que se cultivan frutales, alfalfa y aceitunas: Santa Rosa, Milla Nueve, Tabalí, Agua de Lazo, El Molle, Yervas Buenas, Zanjón, Agua Nueva, Peralito, Agua de Tabla y El Tamarugo (fig. 1).

Por la quebrada Algarrobal hacia el sur-este, o hacia sus nacientes (fig. 1), se encuentran norias y vertientes que son destinadas a usos domésticos y riego en pequeñas faenas mineras y predios que se distinguen por cultivar frutales. Algunos afloramientos de agua sólo logran mantener húmedo el suelo donde crecen algunas hierbas y arbustos silvestres. Es notable que en el curso inferior de la quebrada Algarrobal, las norias se encuentran secas y no hay vertientes. Posiblemente el nivel freático ha descendido, escurriendo el agua por gravedad hacia la cuenca. Las lluvias en esta región son muy intermitentes y pueden estar ausentes por años.

5. ESTUDIO POR URANIO

El trabajo se enfrentó como un estudio estratégico tendiente a obtener datos sobre existencia de uranio en el relleno sedimentario de la Cuenca de Algarrobal y presencia de potenciales fuentes de uranio entre las rocas que conforman su marco geológico. La primera línea de trabajo se centró en la información existente por la exploración de Boquerón-Chañar y en un muestreo hidrogeoquímico de los pozos, norias y aguadas del Llano de Algarrobal. El segun

do aspecto del estudio, estuvo dirigido hacia algunos intrusivos y a las volcanitas ácidas de la formación Hornitos, complementando una revisión geológica-radiométrica con muestras geoquímicas orientativas e hidrogeoquímicas de la parte principal de la red de drenaje de la Quebrada Algarrobal. Además, se revisó, en general, el resto de las unidades que conforman el marco geológico.

5.1. Radiometría

En general, la radiometría obtenida no tiene significación, sólo permite algunas conclusiones sobre los valores relativos altos de rocas y las unidades geológicas a las que pertenecen. Sin embargo, este antecedente fue el fundamento principal para la selección de algunas muestras que se analizaron químicamente.

De las unidades estratigráficas sólo es considerable la formación Hornitos, cuya radiometría general es de 60 y 70 cps sufriendo variaciones importantes de acuerdo a la litología, mostrando las volcanitas ácidas valores iguales a 2 y 4 veces el fondo de la formación:

- Volcanitas andesíticas: tiene un promedio de 70 cps con variaciones extremas de 50 y 110 cps.
- Tobas e ignimbritas: presentan valores normales entre 120 y 140 cps, oscilando los extremos entre 90 y 230 cps.
- Riolitas: tienen los mayores valores relativos, 220 y 280 cps.

Los intrusivos terciarios presentan valores radiométricos de cierta consideración, alcanzando un máximo de 160 cps. Algunos pórfidos riolíticos grises relacionados a la formación Hornitos, dieron valores de 200 cps y algo más, lo que presenta atractivos los cuerpos de esa litología. El resto de las rocas intrusivas no tienen radiometría significativa.

La revisión radiométrica de los testigos de sondeos de Boquerón-Chañar, no tuvo reflejo alguno de importancia, descartando así cualquier análisis con ellos.

5.2. Geoquímica

Se ejecutaron 11 análisis químicos por uranio en rocas y 8 en suelos relacionados directamente a los afloramientos donde se obtuvieron las muestras de rocas. De estos análisis 3 corresponden a intrusivos del complejo granítico terciario, 2 a pórfidos riolíticos, 5 a tobas y riolitas de la formación Hornitos y 1 a queratófiros asignados a la formación Bandurrias.

Las determinaciones químicas se hicieron por uranio móvil y uranio total y para analizar los resultados, se usaron como patrones los contenidos promedios de uranio mundiales de 5,0 ppm para riolitas y 3,5 ppm para granitos.

Los contenidos de uranio de los intrusivos están bajo los promedios normales, sin embargo arrojan razones uranio móvil/uranio total relativamente buenas. En cambio las riolitas, presentan valores que se ajustan a los

contenidos promedios para estas rocas, con regulares razones uranio móvil/uranio total.

Las muestras de suelo, no obstante, mejoran la situación presentada. Ellas, en general, dan valores superiores a los de las rocas relacionadas, indicando que los productos de meteorización de éstas en alguna forma se enriquecen teniendo importancia en la movilización del uranio que potencialmente existe en algunas rocas del área. Por otra parte, reflejan un aspecto positivo al comparárseles con los contenidos promedios de un suelo normal, que varía entre 1 y 1,5 ppm (Moxham y otros, 1976), los que son superados entre 2 y 15 veces.

Además, el análisis químico de aguas subterráneas recogidas en el área de afloramiento de las rocas muestreadas, entregan contenidos de uranio altamente significativos, sobre todo en relaciones a granitos y riolitas.

Es importante tener presente, que las rocas muestreadas representan un pequeño porcentaje de los intrusivos y riolitas existentes en la región, existiendo, además, numerosos cuerpos riolíticos rojos que no fueron analizados. Frente a esto, la probabilidad de encontrar mejores rocas fértiles es muy alta.

5.3. Hidrogeoquímica

Con el objeto de tener un ejemplo estratégico de la dispersión de uranio en el drenaje asociado a la cuenca, se realizó un muestreo de aguas subterráneas en

la Quebrada Algarrobal. Además, se recolectaron muestras de los pozos de sondajes, inundados, en Boquerón-Chañar y de todas las norias y vertientes esparcidas en el Llano de Algarrobal.

En general se tomaron dos muestras de cada depósito una de las cuales fue acidulada, con HCl a 0,1 N, hasta dejarla en un pH = 2. Las medidas de pH naturales varían entre 7 y 10. Los resultados de los análisis químicos en ambas muestras, no reflejaron diferencias significativas debido, posiblemente, a los bajos contenidos y a la rapidez con que se realizaron los tratamientos de laboratorio. Las determinaciones químicas se hicieron por fluorimetría.

Como patrones de comparación, se tomaron algunos valores mundiales. Según informaciones del Servicio Geológico y la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos de Norte América (1956), las aguas subterráneas de terrenos normales tienen valores de uranio inferiores a 2 ppb y aquellas provenientes de sedimentos volcánicos y tobáceos favorables para depósitos de uranio, pueden contener entre 10 y 250 ppb. Por otra parte, Moxham y otros (1976) indican que las aguas subterráneas normales en áreas de tobas riolíticas tienen un contenido de uranio máximo de 10 ppb.

5.3.1. Quebrada Algarrobal

Siquiendo el curso de la Quebrada Algarrobal se recolectaron catorce muestras de agua, correspondientes a siete puntos, cubriendo el curso medio de la Quebrada.

El curso superior no se revisó y el curso inferior tiene algunas norias, por lo menos tres, que se encuentran secas.

Los contenidos de uranio varían entre 4,5 y 95,5 ppb, reflejando valores normales para terrenos favorables. Lo notable es la variación que sufren las aguas de un punto a otro donde se encuentran influencias del dominio litológico del lugar; seguramente tiene importancia también la red de quebradillas tributarias de la Quebrada Algarrobal. Las aguas provenientes de norias, que tienen agua aproximadamente a 5 m, tienen valores de uranio máximos de 10,5 ppb, en cambio las aguas que provienen de afloramientos naturales, que se han denominado vertientes, sobrepasan los 18 ppb alcanzando 95 ppb.

Todas las muestras importantes arrojan valores normalmente altos para terrenos fértiles, dando esta condición a la zona de dominio de las rocas del Terciario Inferior.

Son notables tres casos:

- 1) Un pequeño pozo, con agua a 1 m, en la Quebrada Nauche, dio valores de 41,8 ppb y 39,1 ppb para la misma muestra pero acidulada. Este pozo se encuentra en el dominio de un plutón granodiorítico de gran extensión areal.
- 2) Una presa pequeña en la Quebrada Algarrobal, construída seguramente para una planta de beneficio antigua (abandonada hace muchos años) de la mina Bronce de Jarilla. Dio valores de 18,2 y 48 ppb, correspondiendo

el segundo a una muestra acidulada. El dominio litológico del lugar corresponde a volcanitas de la formación Hornitos.

- 3) Un afloramiento superficial de agua, que se ha denominado vertiente, donde el agua percola en el suelo creando una zona húmeda y algunos charcos pequeños. Las muestras de uno de estos charcos tienen un contenido de uranio de 95,5 y 86,4 ppb, habiendo sido acidulada la segunda muestra. Este lugar se encuentra en pleno dominio de la formación Hornitos y en una sección de ésta donde predominan tobas y riolitas. Específicamente en el lugar del muestreo, aflora una riolita a la cual también se le hizo un análisis químico dando un bajo contenido de uranio pero una buena razón U_m/U_t ; la roca dio 2,5 ppm y el suelo 4 ppm.

Todos estos valores altos, con un buen criterio, pueden ser considerados óptimos para terrenos que presentan favorabilidad geoquímica de uranio, jugando un papel importante las riolitas y tobas, también algunos intrusivos, es decir, buena parte de las rocas que constituyen la Precordillera de la región de Algarrobal.

5.3.2. Llano de Algarrobal

Las muestras de agua obtenidas en los pozos de sondajes de Boquerón-Chañar (fig. 1), indican valores variables entre 0,5 ppb y 13,6 ppb teniendo un promedio de 2,5 ppb. Este promedio refleja una normalidad superior y, si se considera que el 50% está sobre el promedio con valores que superan las 4 ppb alcanzando 13,6 ppb, es posible interpretar estos resultados como interesantes en el sentido de

que reflejan la existencia de uranio. De ninguna manera estas aguas muestran el contenido del elemento en los pozos, solamente indican que las aguas subterráneas están lavando y extrayendo el uranio que pudiera existir en alguna parte de los sedimentos que rellenan la cuenca.

Una muestra de un pozo de agua doméstico, actualmente en uso en Boquerón-Chañar, dio un valor de 3,2 ppb de uranio, lo que es superior al promedio de los sondajes y al valor de un terreno normal. La importancia es que el agua de este pozo no está detenida como es el caso de los pozos de sondajes de exploración.

En el sector central del Llano-Estación y Posada Algarrobal (fig. 1) - cuatro norias arrojaron un contenido promedio de 3 ppb de uranio en sus aguas, lo que también tiene un cierto significado considerándoseles como valores de normalidad superior.

Las 11 aguadas existentes en el sector marginal occidental y nor-occidental del llano (capítulo 4.2, fig. 1), tienen agua subsuperficial, en vertientes y norias, a profundidad general máxima de 4 m. Las aguas que se encuentran en uso dieron un valor promedio de su contenido de uranio igual a 3,7 ppb, lo que significa casi el doble del valor que se ha dado para un terreno normal.

Los contenidos de uranio aumentan en dirección NE-SW, encontrándose los mayores en el sector de descarga de aguas de la cuenca hacia la Quebrada Carrizal. Aquí el agua subterránea choca contra la pared impermeable y asciende por capilaridad produciéndose una especie de rebal-

se. En este sector también se produce la depositación calcárea superficial (cap. 4.1.). En el extremo sur frente a la quebrada Carrizal, las aguas tienen contenidos variables entre 3 y 9 ppb, en cambio las aguadas de más al norte tienen valores entre 2 y 3 ppb, alcanzando una muestra 4,5 ppb.

Nuevamente hay una evidencia de la existencia de uranio en alguna parte de la cuenca. A pesar de que las aguas de ese sector son de carácter superficial, es innegable que tienen influencia más profunda, dado por la información hidrológica (cap. 4).

Los valores del sector central del llano se acercan a los de las aguadas, manteniéndose éstos algo superiores y, en forma puntual, hay algunos bastante mayores. Aquellas norias explotan el acuífero más superficial de la cuenca, lo que es un antecedente de cierto valor en las relaciones de estos análisis porque podrían dar una generalidad en el contenido de las aguas, pero las aguadas tienen aparentemente otras influencias (cap. 4.2. y 4.3.).

Bravo (1978) realizó numerosos análisis químicos de muestras de agua recolectadas en los pozos y norias del Llano de Algarrobal, encontrando cationes y aniones de alto significado en el poder de transporte de uranio de las aguas subterráneas. El más abundante de los cationes encontrados es el sodio, siguiéndole en abundancia calcio y magnesio. Los aniones presentes son cloruros, sulfatos y bicarbonatos.

Estos antecedentes sumados a informaciones del presente estudio sobre la cuenca, como son la presencia de calcretas y carbonato de calcio en el sedimento, pH de las aguas subterráneas entre 7 y 9 para la mayoría de las muestras y temperaturas adecuadas fluctuantes entre 15° y 22°, permiten suponer con seguridad la existencia de sales y iones complejos mediante los cuales se efectúa el transporte de uranio en el agua. En un sentido general, de acuerdo a Morton (1977), ellos podrían ser:

- 1) $[\text{UO}_2 (\text{CO}_3)_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2-}$
- 2) $\text{Na} [\text{UO}_2 (\text{CO}_3)_2]$
- 3) $\text{Mg}_2 [\text{UO}_3 (\text{CO}_3)_2]$
- 4) $\text{Ca}_2 [\text{UO}_3 (\text{CO}_3)_3]$
- 5) $[\text{UO}_2 (\text{CO}_3)_3]^{4-}$
- 6) UO_2CO_3
- 7) $[\text{UO}_2 (\text{OH})]^+$
- 8) $[\text{U} (\text{OH})]^{3+}$
- 9) $(\text{UO}_2)^{2+}$
- 10) Complejos de sulfato de uranio $[\text{UO}_2\text{SO}_4]$
- 11) Complejos de cloruro de uranilo $[\text{UO}_2 (\text{Cl})_2]$

5.4. Geofísica

El trabajo de geofísica efectuado, consistió en perfilaje gama de 10 pozos de sondaje en el yacimiento Boquerón-Chañar (Rojas, T., 1981).

Entre los 49 sondajes efectuados para la exploración y cubicación de Boquerón-Chañar se eligieron 10 pozos para realizar los perfilajes considerando su grado de habilitación, profundidad de ésta respecto al espesor de la sobrecarga aluvial y ubicación relativa, de modo que se cubriera el área lo más uniformemente posible.

Las conclusiones sobre el perfilaje (Rojas, T., 1981) se resumen de la siguiente forma:

- Cuatro pozos presentaron un valor levemente anómalo, ubicándose en los 25 m superficiales en todos ellos.
- Los perfiles permiten diferenciar niveles con distinta favorabilidad por uranio en el material aluvial (sobrecarga).
- Los picos anómalos encontrados tienen sólo ese significado y en ningún caso constituyen concentraciones anómalas por uranio.
- Proyectando los resultados obtenidos, es posible afirmar que el contenido medio de la sobrecarga de Boquerón-Chañar es de 18 ppm Ue aproximadamente.

Para cualquier análisis que se haga sobre los resultados del perfilaje, hay que considerar tres aspectos que tienen influencia directa sobre ellos: no hay información sobre diámetros de los sondajes ni revestimiento de los pozos; además éstos están con agua a partir de los 25 m. Rojas (1981) considera que los valores obtenidos deben incrementarse en un 15% ante esta situación. Pero es un cálculo estimado y por lo tanto sólo es necesario tener presente que los resultados deben ser algo superiores a las cifras dadas.

A pesar de que los resultados obtenidos son bajos, no es posible desechar la significancia de ellos al compararlos con valores normales de uranio en rocas sedimentarias. Las areniscas tienen un contenido normal promedio de 0,5 ppm y los suelos de 1 a 1,5 ppm (Moxham y otros, 1976), lo que indica que en el relleno de la cuenca posiblemente hay contenidos de uranio superiores a los normales, considerando que este material aluvial es asimilable a areniscas poco consolidadas y que la parte analizada en el perfilaje de los pozos siempre correspondió al relleno aluvial de la cuenca.

Un contenido general de 18 ppm Ue para el relleno de la cuenca en un sector de ella, como Boquerón-Chañar, de por sí tiene importancia y permite generalizaciones que llevan a conclusiones teóricas de mayor importancia aún, tomando en cuenta el volumen enorme de material y la información entregada en el resto de las actividades de este estudio. Se tendría allí una gran reserva potencial que podría constituir uno o más yacimientos de importancia mediante algún proceso de concentración, lo que es muy fácil y probable que suceda en una cuenca como ésta.

Aunque sólo cuatro pozos reflejan la existencia de niveles subsuperficiales levemente anómalos, es posible deducir la existencia de otros, que se insinúan en los registros análogos, a distintas profundidades, revelando variedad de contenidos de uranio condicionada a la distribución y características de esos niveles que constituyen el relleno aluvial.

6. CONCLUSIONES

El análisis de la geología de la Cuenca de Algarrobal permite concluir que existen las condiciones para que ocurra una depositación de uranio. Ella podría ubicarse en niveles permeables existentes en el relleno de la cuenca, en accidentes topográficos subterráneos como quebradas y cubetas o entrampamientos producidos por embalses naturales y asociado a las zonas de meteorización y fracturamiento de la roca de basamento. En general puede estimarse que la depositación de uranio tiene una relación directa con las aguas subterráneas ya que serían éstas el medio de movilización.

No hay antecedentes para decidir lugares específicos en que se produciría la depositación, pero es posible indicar como de mayor favorabilidad el margen occidental de la cuenca que corresponde a la zona de mayor acumulación de agua subterránea, corroborado también por los contenidos de uranio en las aguas de ese sector. Esto no quiere decir que no haya otros lugares favorables.

En el material aluvial que rellena la Cuenca de Algarrobal, se detectó la presencia, más o menos generalizada, de uranio en baja cantidad relativa pero importante al considerar su volumen. Esto unido a la evidencia de movimiento de agua subterránea, permite concluir que puede acumularse uranio en alguna parte.

La fuente de uranio debe encontrarse fundamentalmente en los sedimentos de relleno, pero no se puede negar la posibilidad de un aporte adicional de las rocas que

conforman el marco geológico. Además, de estas rocas proviene el aporte de sedimentos a la cuenca y es importante tener presente que en algunos sectores mineralizados cercanos, en la Cordillera de la Costa al menos, hay antecedentes de indicios auríferos.

El estudio del marco geológico realizado, no permitió determinar rocas fuentes de uranio para precisar aportes externos a la cuenca. Sin embargo, los resultados reflejan algunas perspectivas en rocas volcánicas ácidas de la formación Hornitos y en algunos intrusivos, fundamentalmente en los pórfidos riolíticos y granitos. No se debe olvidar tampoco las tobas riolíticas de Cerro Blanco de las cuales no hay antecedentes en este sentido.

Los contenidos de uranio de las aguas de la Quebrada Algarrobal, presentan gran irregularidad entre un lugar y otro, algunos de los cuales son muy atractivos, esto se atribuye a una gran influencia del dominio litológico, fundamentalmente considerando los aportes parciales a la quebrada principal por las quebradillas tributarias. Pero el flujo hacia la Cuenca de Algarrobal no es constante, en general el movimiento de aguas en la hoya hidrográfica no es constante. El movimiento de agua, así como el del uranio, debe realizarse esporádicamente cuando hay mayor saturación de agua en el relleno de las quebradas, especialmente cuando ocurren aluviones causados por las lluvias en las zonas altas de la precordillera.

Se cumpliría para la cuenca, en un sentido general, con cinco parámetros determinantes de un ambiente necesario para que exista depositación de uranio (según Morton, 1977) en un medio sedimentario:

- 1) Acuíferos permeables con flujos potenciales suaves.
- 2) Origen de U^{6+} , principalmente interno, proveniente de clastos incluidos en el sedimento de relleno de la cuenca, y posiblemente externo, de rocas del marco geológico.
- 3) Agua subterránea adecuada para efectuar el transporte del uranio, con sales y iones apropiados en condiciones de acidez y temperaturas convenientes (cap. 5.3.2.).
- 4) Compuestos reactivos o adsorbtivos en los acuíferos que causarían la captura del uranio, como: hematita, apatita, epidota y clorita, provenientes del sedimento, basamento y rocas del marco geológico.
- 5) Posibles mecanismos de reducción de U^{6+} a U^{4+} que causarían la fijación del uranio. Principalmente Fe^{2+} liberado por descomposición o desintegración de pirita, existentes en el sedimento y basamento.
- 6) Finalmente, otro aspecto importante es que todo lo anterior se está produciendo en una cuenca sedimentaria cerrada.

Es evidente que para determinar la ocurrencia del uranio es necesario mayor trabajo, pero es innegable la importancia del análisis hecho de la información reunida. Por ello, se propone la Cuenca de Algarrobal como un modelo de depositación de uranio.

Ante la posibilidad de continuar en un proyecto de exploración, es necesario insistir en la investigación regional y realizar alguna labor de detalle, que debe involucrar sondajes tácticos para obtener mayor información del material aluvial de relleno y de la zona meteorizada, y fracturada, de la roca de basamento. Las limitaciones que se desprenden de este trabajo, imposibilitan una prospección detallada carente de riesgos importantes.

7. BIBLIOGRAFIA

- ABAD, E., 1976a. Geología de la Precordillera al Noreste de Vallenar, entre latitudes 28° y 28°30' S. Provincia de Atacama. Universidad de Chile, Dpto. de Geología, Tesis de grado, 213 páginas, 57 figuras, 30 fotos, 1 mapa geológico 1:100.000, Santiago.
- ABAD, E., 1976b. Geología del distrito cuprífero de Carrizal Alto y zonas adyacentes, en Información Técnica Area Carrizal Alto. Comisión Chilena de Energía Nuclear. 54 págs., 5 figs., 6 anexos. Inédito. Santiago.
- ABAD, E., 1980. Cuadrángulos Estación Algarrobal, Yervas Buenas, Cerro Blanco, Merceditas y Tres Morros, Región de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 38, Santiago.
- ABAD, E., 1981. Estudio geológico de la Cuenca de Algarrobal bajo aspectos de favorabilidad para la deposición de uranio. Comisión Chilena de Energía Nuclear, 65 págs., 5 tablas, 6 mapas, 10 registros análogos. Inédito. Santiago.
- BIESE, W., 1942. La distribución del cretáceo inferior al Sur de Copiapó. Anales del Primer Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología Santiago de Chile, pp. 429-466, Tomo II.

- BRAVO, N., 1978. Estudio Hidrogeológico de la Cuenca Totoral-Algarrobal, III Región. Tesis de título, Univ. de Chile, 99 págs., 2 Tablas, 14 Figs. 3 mapas, Santiago.
- BRUGGEN, J., 1950. Fundamentos de la Geología de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago.
- CORVALAN, J., 1974. Estratigrafía del Neocomiano marino de la región al sur de Copiapó. Revista Geológica de Chile N° 1, pp. 13-36, 8 Figs.
- ESPILDORA, B. y KARZULOVIC, J., 1969. Estudio Preliminar sobre los recursos hidrológicos de la región de Algarrobal en la Provincia de Atacama, Chile. Compañía de Acero del Pacífico. 22 págs., 4 planos, 1 anexo. Inédito. Vallenar.
- FALCON, E. y SANCHEZ, J., 1972. Avance Hidrogeológico de la Cuenca Totoral-Algarrobal, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, 8 págs. y 5 figs. Inédito. Santiago.
- FARRAR, E.; CLARK, A.H.; HAYNES, S.J.; QUIRT, G.S. and CONN, H.; ZENTILLI, M.; 1970. K-Ar Evidence for the Post-Paleozoic migration of granitic intrusion foci in the Andes of northern Chile. Earth and Planetary Science Letters 10 (1970) 60-66. North-Holland Publishing Company.

- JENSEN, O., 1976. Geología de la cordillera de las nacientes del río Copiapó, entre los 27°53' de latitud S, Provincia de Atacama, Chile. Univ. de Chile, Tesis de Grado para optar al título de Geólogo.
- LOPEZ, N., 1970. Informe sondaje BD-35, Boquerón-Chañar. CAP, Vallenar. Inédito.
- MORAGA, A., 1968. Informe y descripción litológica del sondaje N° 25, Boquerón-Chañar. I.I.G. Santiago. (Anexo a Moraga y otros, 1969).
- MORAGA, A.; ORTIZ, F. y RIVADENEIRA, M., 1969. Exploraciones Geológicas, Geofísicas y por sondajes en el yacimiento de Hierro Boquerón-Chañar, Provincia de Atacama, Tomo I. Instituto de Investigaciones Geológicas. Inédito. Santiago.
- MORTIMER, C., 1969. The Geomorphological Evolution of the Southern Atacama Desert, Chile. A thesis submitted to the University of London for the Degree of Doctor of Philosophy Department of Geology, University College, London.
- MORTON, R.D., 1977. Epigenetic uranium deposits in sedimentary-metasedimentary sequences (a brief guide to characteristics and genetic mechanisms). University of Alberta. T6G 2E3. Edmonton, Alberta, Canadá.

- MOXHAM Y OTROS, (Personal del Proyecto CHI/74/005), 1976. Algunas notas sobre la geoquímica del uranio, Proyecto Exploración de Uranio en Chile (CHI/74/005), CCHEN-PNUD, 26 págs. Inédito. Santiago.
- MUÑOZ-CRISTI, J., 1958. Reconocimiento en la parte SW de la Provincia de Atacama. Instituto de Geología, Universidad de Chile, Publicación N° 11. Santiago. 4 figs., 22 fotografías, 1 tabla, 1 mapa geológico.
- ROJAS, T., 1981. Perfilaje gama de pozos en el yacimiento de hierro Boquerón-Chañar. CCHEN, 6 págs., 10 registros análogos. Inédito. Santiago.
- SEGERSTROM, K., 1959. Geología del Cuadrángulo Los Loros. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile Vol. I, N° 1, Santiago.
- SEGERSTROM, K. y PARKER, R. L., 1959. Geología del Cuadrángulo Cerrillos. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, Vol. I, N° 2, Santiago.
- SEGERSTROM, K., 1960. Geología del cuadrángulo Quebrada Paipote: Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile, Vol. II, N° 1, Santiago.
- SEGERSTROM, K. y RUIZ, C., 1962. Geología del cuadrángulo Copiapó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile. Vol. III, N° 1. Santiago.

SEGERSTROM, K. 1968. Geología de las hojas Copiapó y Ojos del Salado. Instituto de Investigaciones Geológicas, boletín N° 24. Santiago.

SERVICIO GEOLOGICO Y COMISION DE ENERGIA ATOMICA DE LOS ESTADOS UNIDOS, 1956. Técnicas para la prospección de uranio y torio. Actas de la Conferencia Internacional sobre la utilización de la Energía Atómica con fines pacíficos, VI, 370-374.

TAYLOR, G., 1947. Groundwater studies in the province of Atacama, Chile. (Algarrobal Región, págs. 143 a 154). U.S. Geological Survey. (I.I.G., Santiago).

VERGARA O., L., 1973. Análisis del Relleno Aluvial en la Zona de los Piques, Boquerón-Chañar. CAP, Vallenar. Inédito. 8 págs. 2 figs.

ZENTILLI, M., 1974. Geological Evolution and Metallogenic Relationships in the Andes of Northern Chile Between 26° and 29° South. A thesis of degree of Doctor of Philosophy. Queen's University, Canadá.