

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº	AÑO
1	1974

05.74.02

OBSERVACIONES GEOLOGICO-TECTONICAS Y CONSIDERACIONES
SOBRE LA GEOQUIMICA DEL URANIO EN LAS PLUTONITAS DE
LAS SIERRAS DE LOS GIGANTES, PROV. DE CORDOBA, REPUB-
LICA ARGENTINA.

Por: Hugo B. NICOLLI, Hugo N. LUCERO y Mirtha A. GAMBA.

Actas del Quinto Congreso Geológico Argentino.

Buenos Aires

1974

HUGO B. NICOLLI, HUGO N. LUCERO Y MIRTHA A. GAMBA

**OBSERVACIONES GEOLOGICO-TECTONICAS Y
CONSIDERACIONES SOBRE LA GEOQUIMICA
DEL URANIO EN LAS PLUTONITAS DE
LAS SIERRAS DE LOS GIGANTES, PROV.
DE CORDOBA, REPUBLICA ARGENTINA**

DE ACTAS DEL QUINTO CONGRESO GEOLOGICO ARGENTINO

BUENOS AIRES

1974

OBSERVACIONES GEOLOGICO-TECTONICAS Y CONSIDERACIONES
SOBRE LA GEOQUIMICA DEL URANIO EN LAS PLUTONITAS
DE LAS SIERRAS DE LOS GIGANTES, PROV. DE CORDOBA
(REPUBLICA ARGENTINA)

Por HUGO B. NICOLLI*, HUGO N. LUCERO** y MIRTHA A. GAMBA**

RESUMEN

Se hacen algunas consideraciones sobre el ambiente estudiado, el cual petrológicamente corresponde a una provincia granítico-diasquistífera. El granito dominante es microclínico, porfiroide, muy alterado y con frecuentes penetraciones pegmatíticas que guardan relación con diaclasas según sistemas rasantes o subrasantes.

El uranio de estas plutonitas muestra una distribución no homogénea. Los contenidos, se considera que fueron en un momento anterior relativamente elevados, y se redistribuyeron por fenómenos secundarios posteriores a la alteración de la roca, dando lugar a altas concentraciones (hasta más de 200 ppm U) en el área de la manifestación nuclear "Schlagintweit" y otras. Este fenómeno guarda, probablemente, relación con una distribución anómala de los contenidos de fósforo y con diversos factores estructurales, tales como el intenso diaclasamiento. Llamamos la atención los altos valores radiométricos en relación a los de uranio obtenidos por el método fluorimétrico.

También se hacen consideraciones estadísticas sobre la distribución del uranio, su ajuste a un modelo lognormal con separación de subpoblaciones y se dan los lineamientos a seguir en futuras investigaciones geoquímicas en el área.

ABSTRACT

A discussion on the studied environment, a granitic-diasquistiferous province, is made at the beginning. The dominant rocks is a microclitic, porphyritic, weathered granite.

Uranium from these rocks shows a non homogeneous distribution. In the "Schlagintweit" area it is supposed that the U content, which previously had moderately values, attained very high concentration (up to 200 ppm U) after the rock weathering. This took place probably through a redistribution due to secondary processes. This fact may be related to an anomalous distribution of phosphorous content and to several structural factors (one of which could be the strong jointing).

Attention is called to the high U values obtained through radiometry as compared to those obtained through fluorimetry.

Statistical considerations on the U-distribution and its fitting to lognormal type distributions are also included. Finally, the next steps to be taken to continue the research on that area are enumerated.

INTRODUCCION

Si bien queda mucho por aclarar en cuanto al problema planteado por la radiactividad de las rocas, es conocido el hecho que su distribución no es homogénea, coincidiendo los fondos radiactivos más elevados con la presencia en la corteza terrestre de afloramientos graníticos, ya que las rocas sedimentarias,

* Comisión Nacional de Energía Atómica; Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

** Comisión Nacional de Energía Atómica.

las metamórficas y las eruptivas de composición no granítica presentan fondos radiactivos más bajos.

Una mayor disponibilidad actual de análisis geoquímicos permiten asegurar que los elementos radiactivos se hallan extremadamente dispersos en las rocas de profundidad, razón por la cual la radiactividad de las mismas es sensiblemente más baja que la de rocas de superficie. Esta evidencia ha sugerido la idea de una intensa migración geoquímica de dichos elementos para tomar una repartición periférica en la corteza. No están claras las causas de esa migración, pero es indudable su asociación con el emplazamiento de grandes cuerpos graníticos.

Estos hechos hablan por sí solos de la importancia de los estudios sobre estas masas rocosas, dando razón a Raguin (1957): "*Et l'on retombe toujours sur le granite comme source première de la métallogénie de l'uranium*".

Si bien las técnicas actuales de prospección están basadas en la detección de la actividad γ , medida que puede ser un reflejo aceptable del contenido uranífero de una roca, no es suficiente este criterio para evaluar las reales posibilidades de existencia de concentraciones anómalas del elemento. Por esta razón, la idea básica que ha guiado el desarrollo de la presente investigación, ha sido la del estudio sistemático de los afloramientos graníticos de la Sierra de los Gigantes, con el objeto de conocer algunos principios fundamentales que rigen el comportamiento geoquímico del uranio en el área y la relación entre la distribución del elemento, de la radiactividad y el emplazamiento de anomalías.

La dimensión de dichos afloramientos ha exigido un muestreo prolijo y extenso, pero la relativa homogeneidad petrográfica del área ha permitido la aplicación de métodos estadísticos con poblaciones de referencia limitadas.

El trabajo incluye algunas consideraciones de carácter geológico y petroológico y sobre la tectónica regional y local, un análisis estadístico de la distribución de los contenidos de uranio total y de los valores radiactivos, y una discusión sobre la interpretación geoquímica dada a estos hechos con la finalidad de deducir algunos principios básicos que, como hipótesis de trabajo, pueden ser aplicados en el estudio futuro de otras áreas graníticas.

I. CONSIDERACIONES GEOLOGICAS

Las rocas graníticas constituyen el elemento dominante en la región; les sigue un grupo de metamorfitas y otro de rocas filonianas derivadas del magma granítico, las cuales afectan a ambos complejos. A pesar de que su aspecto y pigmentación varían dentro de ciertos límites en algunas áreas, la plutonita posee una composición casi invariablemente granítica. Los elementos metamórficos son gneisses, cuarcitas micáceas, anfibolitas y calizas cristalinas; dentro de la superficie estudiada, las rocas de este grupo ocupan los sectores orientales, ubicados principalmente en un escalón tectónico más bajo que el que contiene a las masas graníticas. El séquito filoniano de la plutonita consiste esencialmente en pegmatitas de muy variada índole, observándose también intercalaciones poco frecuentes de aplitas.

El relleno moderno ocupa las depresiones erosivas y cubre extensas superficies elongadas meridionalmente situadas entre las grandes fracturas de bloque. Las líneas de investigación geoquímica se restringen exclusivamente al área granítica.

1. 1. *Los granitos y su acompañamiento filónico*

Estas rocas poseen muy variadas características macroscópicas, encontrándose entre ellas granitos porfiroides, normales y hasta aplíticos, poseedores de diversas pigmentaciones, desde claras a grisáceas y oscuras; aún los xenolitos autígenos, muy abundantes en algunos sectores, evidencian una clara composición granítica, pues existe una persistencia poco común de la subordinación del feldespato calcosódico frente al potásico en toda la región estudiada. Otra característica propia de este complejo plutónico es que la especie potásico-feldespática siempre se identifica como microlino.

Puede señalarse una tercera característica del granito de la zona: la naturaleza de su acompañamiento filónico es de esencia puramente diasquística.

La variedad porfiroide es la más desarrollada arealmente, siguiéndole la equigranular gruesa y por último la de los tipos aplitoides que pese a sus coloraciones relativamente más subidas no dejan de ser petrográficamente cabales granitos. El estudio de numerosos cortes delgados revela en algunos casos, con respecto a la relación feldespato potásico-cuarzo, composiciones tendientes a términos más bien pobres en este último mineral.

Los aplogranitos grises, que en algunos casos parecen corresponder a emisiones relativamente tardías en el emplazamiento granítico regional, se caracterizan por una mayor proporción de mafitos, mereciendo citarse un cierto contenido augítico no presente en los demás términos.

El orden de frecuencia observado en los minerales esenciales es el siguiente: en primer lugar, microlino peritítico, presente en gruesos individuos que albergan unidades de algunos de los otros componentes de la roca; en segundo término aparecen feldespatos calcosódicos o bien cuarzo (este último es casi siempre anhedral y posee variado grado de extinción ondulosa). El feldespato no potásico es casi siempre oligoclasa mayoritariamente subhedral y con una incipiente alteración a sericita y caolín. Los componentes oscuros, generadores de algunos elementos opacos, son esencialmente biotita con diversos grados de alteración y en contados casos algún piroxeno generalmente fresco. Los minerales accesorios son los comunes en este tipo de roca, entre los cuales merecen especial atención la apatita y el circón; la primera, fluorescente, con tamaños mayores que los normales (Linares y Latorre, 1968) y el segundo, siempre como inclusión aún dentro de las apatitas, siendo ambos conspicuos portadores de uranio.

El único feldespato potásico presente en la zona parece ser microlino peritítico (Pastore, 1932; Linares y Rinaldi, 1967; Toselli, 1969; Gordillo y Lencinas, 1969; Lucero y Rinaldi, 1972). Alguna sección aislada lograda según (100), que muestra una típica macla de Carlsbad, no basta para asegurar la coexistencia de aquél con ortosa, dado que tal asociación de maclaje puede también presentarse en microlinos.

Los cortejos filonianos de macizos graníticos parecen guardar una notable relación de exclusividad entre pegmatitas y pórfiros plutónicos o paraefusivos (Raguin, 1957). Muchos ejemplos en el mundo confirman la realidad objetiva de este hecho petrológico, no faltando en el país y aún en la provincia de Córdoba casos que ponen en evidencia la referida antinomia de términos. El macizo granítico de la Sierra Norte de Córdoba se identifica con un clásico ejemplo de provincia granítico-esquistífera al caracterizarse por una extraordinaria abundancia de penetraciones hipabisales de pórfiros graníticos y riolíticos hasta granodioríticos y riodacíticos pasando por adamelíticos y dellén-

ticos; paralelamente se advierte una ausencia casi total de manifestaciones esquizolíticas ácidas y muy moderada proporción de diasquísticas lamprofíricas.

Estos casos, menos frecuentes que sus recíprocas petrológicas, tales como el macizo de "Achala-Los Gigantes" objeto de este trabajo, admitirían otra explicación: la de que una intensa denudación hubiera arrasado con los sectores cuspidales portadores de pegmatitas tabulares y zonales, respetando sólo las de situación más profunda, poseedoras de difusas limitaciones con las cajas, tal como sucede en la Sierra Norte.

En la unidad estudiada, pese a que la superficie topográfica llega localmente a interceptar el referido nivel de raíces pegmatíticas difusas, no existe manifestación porfírica alguna. Esta circunstancia parece afianzar el concepto de la existencia de unidades plutónicas con características petrológicas peculiares que definen el carácter de sus contenidos filónicos.

El aporte pegmatítico, prácticamente el único representante ígneo post-plutónico de la región, se manifiesta según tres tipos principales, muy desiguales entre sí, especialmente en cuanto a la frecuencia de los individuos que lo integran. El primer tipo, perteneciente a la ya mencionada especie poseedora de difusa limitación con el granito que lo contiene, es de naturaleza simple y está muy poco representado en el ambiente. El segundo, correspondiente a unidades tabulares, es también de composición simple, posee límites y orientación netas y se aloja en toda suerte de diaclasas, con especial preferencia por las de posición no muy alejada de la horizontal. El tercer tipo, que es de pegmatitas más elaboradas y de estructuras zonales, lleva con frecuencia mineralizaciones beneficiables.

1. 2. *Tectónica regional y local*

Existe en el área estudiada todo un sistema subparalelo de grandes fajas de deformación (ver plano) de rumbo NNO-SSE y de naturaleza compresiva, responsable de la estructura en bloques según sistemas de escalones marginales que ha elaborado el actual perfil de la Sierra Grande de Córdoba. Las fallas se inclinan aproximadamente setenta grados hacia el OSO y su carácter inverso queda evidenciado por el sentido de los buzamientos y por el hecho de que los sectores positivos se encuentran hacia el oeste de aquéllas; también por la abundante presencia de milonitas arcillosas y la total falta de grietas. Puede observarse que los peldaños más elevados están ocupados por masas graníticas.

Un segundo juego de fracturas, un tanto más tardías, compresivas y de rumbo ENE-OSO, el cual pudo haber sido originado por una simple fluctuación en la dirección de los empujes, se agrega al primero y determina con él una serie de estructuras diédricas.

No faltan tampoco las discontinuidades de origen tensional, fracturas transversales originadas por movimientos de acomodación; carecen de milonitas y muestran abundante agrietamiento relleno por la acción de soluciones silíceas circulantes.

Si bien el diaclasamiento que muestran estas masas graníticas posee características propias para cada sector, hay juegos muy conspicuos y que desempeñan un papel bien definido como controles de la penetración filónica, especialmente de las pegmatitas del segundo tipo mencionado en el punto anterior. La descarga pegmatítica ha sido evidentemente más intensa en las áreas graníticas de grano grueso, que poseen juegos de disyunción menos apretados y

distanciados entre sí. Paralelamente se nota un incremento de frecuencia de estas penetraciones hacia las vecindades de los afloramientos metamórficos que se encuentran inmediatamente al Este del área investigada.

2. MUESTREO SISTEMÁTICO

La serie de *manifestaciones radiactivas* en el área, localizadas sobre la línea de falla principal (rumbo NNO-SSE) que luego de estudios previos realizados por personal de la Gerencia de Materias Primas de la Comisión Nacional de Energía Atómica, fueron calificadas como *anomalías aéreas* (Gamba y Coco, 1966), *anomalías radimétricas* (Jemma, 1965 y 1966; Anzulovich, 1967) y *mineralizaciones*, evidenciaron la utilidad de un muestreo sistemático por líneas aproximadamente transversales a dicha estructura. Con este criterio se eligieron cuatro líneas principales de muestreo, cuyos recorridos se indican en el plano de ubicación y que denominamos:

Línea de muestreo N° I: Manifestación nuclear "Schlagintweit".

Línea de muestreo N° II: Manifestación nuclear "Schlagintweit" (sector Sur).

Línea de muestreo N° III: Manifestación nuclear "Cerro Aspero".

Línea de muestreo N° IV: Manifestación nuclear "Los Europeos".

Sobre el mismo plano se indican también las posiciones de los puntos A_1 , A_2 , A_3 y A_4 , situados sobre el límite Este de cada anomalía radimétrica, los cuales sirvieron como punto de partida, dentro de cada línea, para la ubicación de los lugares de donde debía ser extraída cada muestra. Fue también objeto de la planificación previa determinar la extensión de cada perfil hacia el E y O de cada anomalía, así como el número de muestras necesarias para un estudio de la distribución areal del uranio con un criterio estadístico. Se decidió al respecto que la extensión de los perfiles hacia el O debía hacerse hasta donde lo permitiese la topografía del lugar, pero cuidando de que por lo menos la línea I atravesase el cordón principal de la Sierra de los Gigantes, llegando hasta Pampa de Achala. Hacia el E las líneas debían sobrepasar la "falla del Matadero" (Gross, 1948) y en lo posible llegar al contacto de los afloramientos graníticos con los esquistos.

En cuanto al espaciamento entre muestras se eligió una equidistancia de 15 m sobre las anomalías radimétricas, designando cada muestra con letras A, B, ..., M, N, ..., K, etc) y de 250 m para la roca de campo (4 muestras por km sobre cada línea) con densificación en las proximidades de las anomalías (distancias menores de 1 km). Al respecto, teniendo en cuenta la utilidad del empleo criterioso de la ley lognormal en estudios geoquímicos (Ahrens, 1953-1966; Coulomb, 1959; Jurain, 1962; Roocke, 1964; Rodionov, 1965; Nicolli, 1966, 1969 y 1970) se eligió un espaciamento entre muestras de acuerdo con un valor logarítmico y se decidió recoger 8 muestras en cada ciclo (serie de razón geométrica = 1,34) a partir de los puntos extremos de cada anomalía, completando así 32 muestras dentro de cada kilómetro (muestras tomadas a 1,00 m; 1,34 m; 1,80 m; 2,40 m; 3,20 m; 4,25 m; 5,65 m; 7,50 m; 10,0 m; 13,4 m... 565 m; 750 m y 1000 m de cada anomalía). Este espaciamento de muestras fue observado estrictamente, tanto en la zona próxima a las anomalías como en las alejadas, empleando teodolito y cinta para fijar los puntos de extracción.

Pese a que no se recogieron muestras de superficie, fue imposible obtener muestras frescas aún en profundidad en razón de la intensa alteración de las rocas del área estudiada. En general, se tomó como norma la eliminación de la parte superficial de los afloramientos hasta unos 30 ó 40 cm, tarea facilitada por el intenso diaclasamiento de la estructura. La toma de muestra se operó entre 50 cm y 2 m de profundidad debiendo recurrir en todos los casos al uso de explosivos.

Con estos procedimientos lograron reunirse más de 300 muestras que fueron luego seleccionadas cuidadosamente para los procesos de preparación previa al análisis:

3. PARTE EXPERIMENTAL

3. 1. *Preparación previa de la muestra*

En las distintas fases de preparación previa de las muestras se han respetado los principios y normas desarrollados por Shaw (1961) y Jones y Beaven (1971).

Para la toma de muestra y selección posterior se tuvo en cuenta la influencia del tamaño de los cristales, razón por la cual en ningún caso se seleccionó una cantidad menor que 5 kg de muestra y cuando los fenocristales de microlino eran muy grandes, se tomaron cantidades que variaban entre 15 y 18 kg de roca, de acuerdo con los principios de Gy (1954), adaptados luego por Lafitte (1957) para estudios geoquímicos.

Una primera trituración llevó el total de la muestra a trozos menores que 1 cm, de los cuales, por sucesivos cuarteos se separaron 250-300 g, que fueron molidos hasta un tamaño inferior a 1 mm (tamiz N° 16, normas Tyler). Luego de una cuidadosa homogeneización se cuarteó nuevamente, y los 120-150 g seleccionados se pulverizaron en mortero de zafiro sintético hasta un diámetro de partícula inferior a 0,147 mm (tamiz N° 100, normas Tyler). Esta fracción perfectamente homogeneizada en un "mixer-mill" se utilizó para el análisis químico.

3. 2. *Determinación de uranio total*

El procedimiento usado —en el que podemos distinguir tres fases: ataque de la muestra, separación cromatográfica y medición fluorimétrica— se basa esencialmente en las técnicas desarrolladas por Coulomb y Goldstein (1956) y Berthollet (1958 y 1968).

La primera fase consiste en una disgregación fuerte de 1g de muestra mediante una mezcla ácida (fluorhídrico, perclórico y nítrico conc.) retornando el residuo con ácido nítrico 2,5 N y separando el insoluble por centrifugación. De esta solución se toma una alícuota de 0,10 ml utilizando una micropipeta y se deposita sobre una banda de papel cromatográfico que luego se coloca en una cubeta conteniendo la mezcla extractante (fosfato de tributilo y "Sangajol"®, 1 : 1 v/v). En esta fase debe hacerse un severo control de la temperatura ambiente (20-21° C) para asegurar una ascensión más homogénea del T.B.P. y una satisfactoria extracción del uranio.

Concluida esta fase se corta y separa la parte superior de la banda de papel que se calcina en navéculas de platino donde, posteriormente, se opera la fusión con una mezcla fundente (fluoruro de sodio y fluoruro de litio,

98:2). Los ensayos previos de fusión sobre muestras patrones dieron resultados satisfactorios.

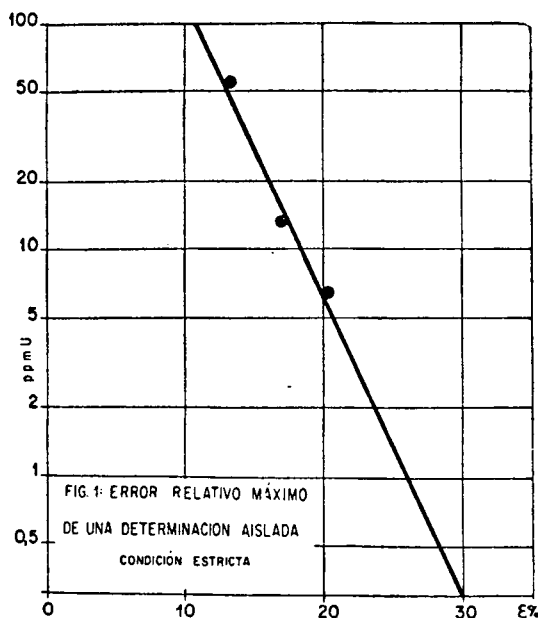
La medición de la fluorescencia se realizó con un fluorímetro "Jarrel-Ash", modelo 26-010 con portamuestras pequeño (navecillas 10 mm ϕ).

Para el análisis se eligieron lotes de 12 muestras por triplicado, operando simultáneamente, también por triplicado, con un blanco y cinco patrones de 0,5; 1; 2; 5 y 10 $\mu\text{g U}$. De esta manera es posible obtener una mayor exactitud en las mediciones ya que se hace la comparación de las muestras problemas con pares de patrones consecutivos muy próximos.

CUADRO I
Determinación fluorimétrica de uranio en rocas graníticas
Reproducibilidad de resultados

Muestra N ^o	Número de determinaciones	\bar{x} (ppm U)	s ²	s	s/ \bar{x}	ϵ (Condición estricta: P = 0,955)
L G. I. 19 E	31	6,6	0,4386	0,66	0,10	0,20
L G. II. C	29	13,5	1,2675	1,13	0,08	0,17
L G. I. 2 E	17	54	11,7500	3,43	0,06	0,13

° Error relativo máximo de una determinación aislada.



° Marca registrada "Shell", solvente alifático, fracción de destilación entre 140°C y 205°C (normas del fabricante).

Observando el cuadro I comprobamos que el error relativo máximo de una determinación aislada disminuye cuando el valor del contenido de U aumenta. Proyectando sobre papel logarítmico los pares de valores *contenido U - error relativo máximo* correspondiente a cada muestra se obtuvo el gráfico de la Fig. 1, en el que apreciamos que para contenidos del orden de 1 ppm U el error relativo es del orden del 27 %, para contenidos del orden de 10 ppm U se reduce al 17 %, en tanto que para valores del orden de 100 ppm U el error relativo debe mantenerse inferior al 11 %.

Por otra parte, si queremos determinar el contenido x_j (ppm U) de una muestra y le adjudicamos un valor x que es la media aritmética de n determinaciones, la fluctuación de valores estará dada por la expresión:

$$\frac{s}{\sqrt{n}}$$

Como todas las determinaciones fluorimétricas fueron triplicadas, obteniendo por lo tanto para cada muestra la media de tres valores, la estimación de la fluctuación para cada una de ellas será:

$$\frac{s}{\sqrt{3}} = 0.58 s$$

CUADRO II

Intervalos de confiabilidad

Muestra Nº	\bar{x}	Condición normal		Condición estricta	
		P	Intervalo de confiabilidad	P	Intervalo de confiabilidad
LG. I. 19 E	6,6	70 %	6,22 < x_j < 6,98	95,5 %	5,84 < x_j < 7,36
LG. II. C	13,5	70 %	12,85 < x_j < 14,15	95,5 %	12,19 < x_j < 14,81
LG. I. 2E	54,0	70 %	52,02 < x_j < 55,98	95,5 %	50,13 < x_j < 57,97

La precisión de las medias obtenidas es muy buena en todos los casos y por lo tanto suficiente a los efectos de una posterior interpretación geoquímica de las mismas.

3. 3. *Resultados analíticos*

El cuadro III incluye los resultados de las determinaciones fluorimétricas de U en ppm, el número de cada muestra y su ubicación en cada línea de muestreo. También consigna los resultados de determinaciones radiométricas e U, efectuadas mediante un escalímetro "Nuclear", mod. ETS 70214, así como la relación entre los dos valores, para las 212 muestras analizadas.

CUADRO III
Situación de las muestras y resultados analíticos

Muestra N°	Ubicación		(°) U total ppm	(°°) e U ppm	Utot/ eU
LG. I. 57 E	9.000	m al E de A ₁	2,1	53	0,04
56 E	8.750	" " " " "	2,0	42	0,05
54 E	8.250	" " " " "	3,2	63	0,05
53 E	8.000	" " " " "	5,1	104	0,05
52 E	7.750	" " " " "	6,4	92	0,07
51 E	7.500	" " " " "	8,6	59	0,15
50 E	7.250	" " " " "	5,1	100	0,05
49 E	7.000	" " " " "	5,7	48	0,12
48 E	6.750	" " " " "	6,0	33	0,18
47 E	6.500	" " " " "	5,6	64	0,09
46 E	6.250	" " " " "	5,5	48	0,11
45 E	6.000	" " " " "	7,8	28	0,28
43 E	5.500	" " " " "	3,3	28	0,12
42 E	5.250	" " " " "	7,7	22	0,35
40 E	4.750	" " " " "	5,2	67	0,08
39 E	4.500	" " " " "	3,5	125	0,03
38 E	4.250	" " " " "	4,4	113	0,04
37 E	4.000	" " " " "	3,9	50	0,08
36 E	3.750	" " " " "	4,2	112	0,04
35 E	3.500	" " " " "	1,7	108	0,02
33 E	3.000	" " " " "	5,0	68	0,07
32 E	2.750	" " " " "	4,0	82	0,05
31 E	2.500	" " " " "	4,3	85	0,05
30 E	2.250	" " " " "	3,1	44	0,07
29 E	2.000	" " " " "	3,7	84	0,04
28 E	1.750	" " " " "	5,3	42	0,13
26 E	1.250	" " " " "	3,6	54	0,07
25 E	1.000	" " " " "	4,8	61	0,08
24 E	750	" " " " "	8,2	52	0,16
23 E	565	" " " " "	5,8	29	0,20
22 E	425	" " " " "	4,7	37	0,13
21 E	320	" " " " "	10,2	52	0,20
20 E	240	" " " " "	8,7	107	0,08
19 E	180	" " " " "	6,6	72	0,09
18 E	134	" " " " "	6,3	60	0,11
17 E	100	" " " " "	5,9	67	0,09
16 E	75,00	" " " " "	7,0	26	0,27
14 E	42,50	" " " " "	16,1	70	0,23
13 E	32,00	" " " " "	119	132	0,90
12 E	24,00	" " " " "	7,6	56	0,14
11 E	18,00	" " " " "	9,5	60	0,16
10 E	13,40	" " " " "	21	71	0,30
9 E	10,00	" " " " "	30	88	0,30

CUADRO III (Continuación)

Muestra Nº	Ubicación	(°) U total ppm	(**) e U ppm	Utot/ eU
LC. I. 8 E	7,50 m al E de A ₁	26	59	0,44
7 E	5,65 " " " " "	151	239	0,63
6 E	4,25 " " " " "	58	175	0,33
4 E	3,20 " " " " "	241	253	0,95
3 E	2,40 " " " " "	89	242	0,37
2 E	1,34 " " " " "	54	124	0,44
1 E	1,00 " " " " "	11,8	33	0,36
A	punto partida línea I	33	154	0,21
B	15,00 m al O de A ₁	22	158	0,14
D	45,00 " " " " "	16,4	115	0,14
E	60,00 " " " " "	3,3	33	0,10
F	75,00 " " " " "	12,6	109	0,12
G	90,00 " " " " "	13,3	76	0,18
H	105,00 " " " " "	14,0	74	0,19
I	120,00 " " " " "	107	165	0,65
J	135,00 " " " " "	8,8	67	0,13
K	150,00 " " " " "	5,5	64	0,09
1 W	1,00 " " " " " K	5,2	85	0,06
2 W	1,34 " " " " "	5,1	59	0,09
3 W	1,80 " " " " "	4,7	73	0,06
4 W	2,40 " " " " "	6,7	35	0,19
5 W	3,20 " " " " "	6,7	46	0,15
6 W	4,25 " " " " "	11,2	85	0,13
7 W	5,65 " " " " "	7,0	106	0,07
9 W	10,00 " " " " "	5,6	128	0,04
11 W	18,00 " " " " "	5,8	76	0,08
12 W	24,00 " " " " "	5,3	59	0,09
13 W	32,00 " " " " "	6,5	29	0,22
14 W	42,50 " " " " "	3,7	42	0,09
17 W	100 " " " " "	8,8	64	0,14
18 W	134 " " " " "	14,1	90	0,16
19 W	180 " " " " "	8,6	56	0,15
20 W	240 " " " " "	8,2	44	0,19
21 W	320 " " " " "	3,9	88	0,04
22 W	425 " " " " "	4,3	56	0,08
23 W	565 " " " " "	8,2	42	0,20
24 W	750 " " " " "	6,1	76	0,08
25 W	1.000 " " " " "	4,9	71	0,07
26 W	1.250 " " " " "	10,2	56	0,18
27 W	1.500 " " " " "	6,1	76	0,08
28 W	1.750 " " " " "	4,1	35	0,12
29 W	2.000 " " " " "	5,1	28	0,18
30 W	2.250 " " " " "	5,3	28	0,19

CUADRO III (Continuación)

Muestra N°	Ubicación	(°) U total ppm	(°°) e U ppm	Utot/ eU
LG. I. 31 W	2.500 m al O de K	5,2	30	0,17
32 W	2.750 " " " " "	2,1	36	0,06
33 W	3.000 " " " " "	4,6	63	0,07
34 W	3.250 " " " " "	5,4	50	0,11
35 W	3.500 " " " " "	6,6	55	0,12
LG. II. 46 E	6.250 " " E " A ₂	5,8	77	0,08
42 E	5.250 " " " " "	2,4	58	0,04
E	5.000 " " " " "	4,4	66	0,07
41 E	4.750 " " " " "	2,1	112	0,02
40 E	4.500 " " " " "	3,3	30	0,11
39 E	4.000 " " " " "	2,9	99	0,03
37 E	3.500 " " " " "	7,0	84	0,08
35 E	2.500 " " " " "	9,3	55	0,11
31 E	2.250 " " " " "	5,0	57	0,09
30 E	2.000 " " " " "	4,7	50	0,09
29 E	1.750 " " " " "	6,2	146	0,04
28 E	1.500 " " " " "	2,7	89	0,03
27 E	1.250 " " " " "	5,1	89	0,06
26 E	1.000 " " " " "	8,1	57	0,14
25 E	750 " " " " "	10,3	81	0,13
24 E	565 " " " " "	8,4	57	0,15
23 E	320 " " " " "	6,6	134	0,05
21 E	240 " " " " "	3,1	92	0,03
20 E	75,00 " " " " "	5,1	47	0,11
16 E	56,50 " " " " "	6,7	60	0,11
15 E	32,00 " " " " "	5,0	61	0,08
13 E	24,00 " " " " "	103	103	1,00
12 E	13,40 " " " " "	5,4	43	0,13
10 E	10,00 " " " " "	5,0	34	0,15
9 E	1,80 " " " " "	7,2	80	0,09
3 E	1,34 " " " " "	4,4	68	0,06
2 E	15 " " O " "	15,3	133	0,12
A	45 " " " " "	13,5	93	0,15
C	60 " " " " "	15,3	80	0,19
D	90 " " " " "	12,6	104	0,12
F	135 " " " " "	15,4	138	0,11
I	150 " " " " "	11,5	59	0,19
J	165 " " " " "	7,2	32	0,23
K	195 " " " " "	6,3	29	0,22
LL	210 " " " " "	6,9	70	0,10
M	225 " " " " "	18,5	67	0,28
N				

CUADRO III (Continuación)

Muestra Nº	Ubicación	(°) U total ppm	(°°) e U ppm	Utot/ eU
LC. II. O	255 m al O de A ₂	3,4	49	0,07
Q	285 " " " " "	13,8	59	0,23
R	300 " " " " "	21,0	98	0,21
RR	315 " " " " "	11,6	106	0,11
U	360 " " " " "	60	138	0,04
V	375 " " " " "	15,4	159	0,10
W	390 " " " " "	13,4	58	0,23
Y	420 " " " " "	8,7	69	0,13
6 W	4,25 " " " " Y	9,4	59	0,16
7 W	5,65 " " " " "	2,9	107	0,03
8 W	7,50 " " " " "	6,9	41	0,17
10 W	13,40 " " " " "	7,0	119	0,06
11 W	18,00 " " " " "	3,5	45	0,08
12 W	24,00 " " " " "	5,0	86	0,06
15 W	56,50 " " " " "	5,8	93	0,06
16 W	75,00 " " " " "	4,4	95	0,05
17 W	100,00 " " " " "	6,9	54	0,13
18 W	134 " " " " "	7,7	71	0,11
20 W	240 " " " " "	8,5	69	0,12
21 W	320 " " " " "	10,5	57	0,18
24 W	750 " " " " "	2,6	91	0,03
26 W	1.250 " " " " "	2,5	32	0,08
27 W	1.500 " " " " "	1,3	42	0,03
28 W	1.750 " " " " "	5,4	92	0,06
29 W	2.000 " " " " "	1,7	24	0,02
31 W	2.500 " " " " "	1,6	129	0,01
33 W	3.000 " " " " "	1,7	57	0,03
LC. III. 49 E	7.000 " " E " A ₃	2,4	46	0,05
46 E	6.250 " " " " "	3,3	39	0,08
44 E	5.750 " " " " "	5,4	48	0,11
43 E	5.500 " " " " "	12,6	35	0,36
42 E	5.250 " " " " "	1,6	50	0,03
41 E	5.000 " " " " "	4,4	32	0,14
40 E	4.750 " " " " "	9,9	17	0,58
39 E	4.500 " " " " "	3,2	75	0,04
38 E	4.250 " " " " "	3,6	61	0,06
36 E	3.750 " " " " "	3,2	53	0,06
33 E	3.000 " " " " "	6,0	117	0,05
32 E	2.750 " " " " "	2,4	51	0,05
31 E	2.500 " " " " "	2,7	59	0,05
28 E	1.150 " " " " "	2,0	35	0,06

Muestra Nº	Ubicación	(°) U total ppm	(°°)	Utot/ eU
25 E	1.000 m al E de A ₃	12,5	158	0,08
24 E	750 " " " " "	14,0	35	0,40
22 E	465 " " " " "	5,0	40	0,13
20 E	240 " " " " "	6,6	60	0,11
16 E	75 " " " " "	11,6	74	0,16
15 E	62,50 " " " " "	3,1	71	0,04
14 E	46,50 " " " " "	4,4	40	0,11
13 E	32,00 " " " " "	4,3	87	0,05
11 E	18,00 " " " " "	2,8	65	0,04
10 E	13,40 " " " " "	5,8	57	0,10
9 E	10,00 " " " " "	12,9	88	0,16
8 E	7,50 " " " " "	9,2	125	0,07
D	45 " " O " "	2,1	71	0,03
G	90 " " " " "	5,1	60	0,09
H	105 " " " " "	3,0	79	0,04
I	120 " " " " "	1,3	80	0,02
J	135 " " " " "	1,3	70	0,02
K	150 " " " " "	2,1	22	0,10
L	165 " " " " "	1,2	95	0,01
.G. III. 12 W	24 m al O de L	1,8	73	0,02
13 W	32 " " " " "	2,4	57	0,04
14 W	46,50 " " " " "	3,7	102	0,04
15 W	62,50 " " " " "	2,0	60	0,03
16 W	75,00 " " " " "	5,0	64	0,08
18 W	134 " " " " "	5,3	23	0,23
19 W	180 " " " " "	5,2	64	0,08
20 W	240 " " " " "	7,8	45	0,17
22 W	465 " " " " "	8,5	59	0,14
23 W	625 " " " " "	5,7	70	0,08
24 W	750 " " " " "	4,0	81	0,05
25 W	1.000 " " " " "	4,6	48	0,10
26 W	1.250 " " " " "	2,5	119	0,02
29 W	2.000 " " " " "	2,3	52	0,04
30 W	2.250 " " " " "	2,5	52	0,05
31 W	2.500 " " " " "	2,2	57	0,04
32 W	2.750 " " " " "	3,5	37	0,09
LG. IV. 12 E	24 " " E " A ₄	1,4	91	0,02
1 W	1,00 " " O " N	8,5	58	0,15
3 W	1,80 " " " " "	3,8	82	0,05
4 W	2,40 " " " " "	4,7	63	0,07
5 W	3,20 " " " " "	7,4	32	0,23
12 W	24,00 " " " " "	3,5	100	0,04
15 W	62,50 " " " " "	5,8	26	0,22
17 W	100,00 " " " " "	7,8	77	0,10

(°) Analistas: H. B. Nicolli y M. A. Gamba.
 (°°) Analistas: M. A. Gamba y N. Causo.

4. ANALISIS ESTADISTICO

A continuación se hace una discusión general sobre la naturaleza estadística de la distribución del uranio. A tal efecto se ha empleado, para el conjunto de valores obtenidos en cada línea de muestreo geoquímico y para el total de valores del área, los respectivos histogramas de frecuencia y las curvas teóricas de densidad de probabilidad. Con el objeto de simplificar el ajuste de dichos valores de referencia a funciones sencillas (rectas) y facilitar el estudio, se ha recurrido a diagramas de frecuencia acumulada en papel de probabilidad (escala gaussiana-lineal y escala gaussiana-logarítmica) en donde se destacan las discontinuidades que limitan cada subpoblación y se pueden estimar las distintas dispersiones de valores en cada caso.

4. 1. *Distribución de U total*

Considerando el conjunto de los 212 valores obtenidos en el estudio de las líneas de muestreo I, II, III y IV, los cuales oscilan entre 1,2 y 241 ppm U, se obtiene una media aritmética de 11,4 ppm U. Si de esta estimación se excluyen los valores extremos más altos (<35 ppm U), el valor obtenido es sensiblemente inferior: 7,1 ppm. El histograma de frecuencias correspondientes (Fig. 5) muestra una fuerte asimetría positiva, puesto que la media aritmética es mucho mayor que el valor más probable (modo estimado \approx 4,9 ppm U).

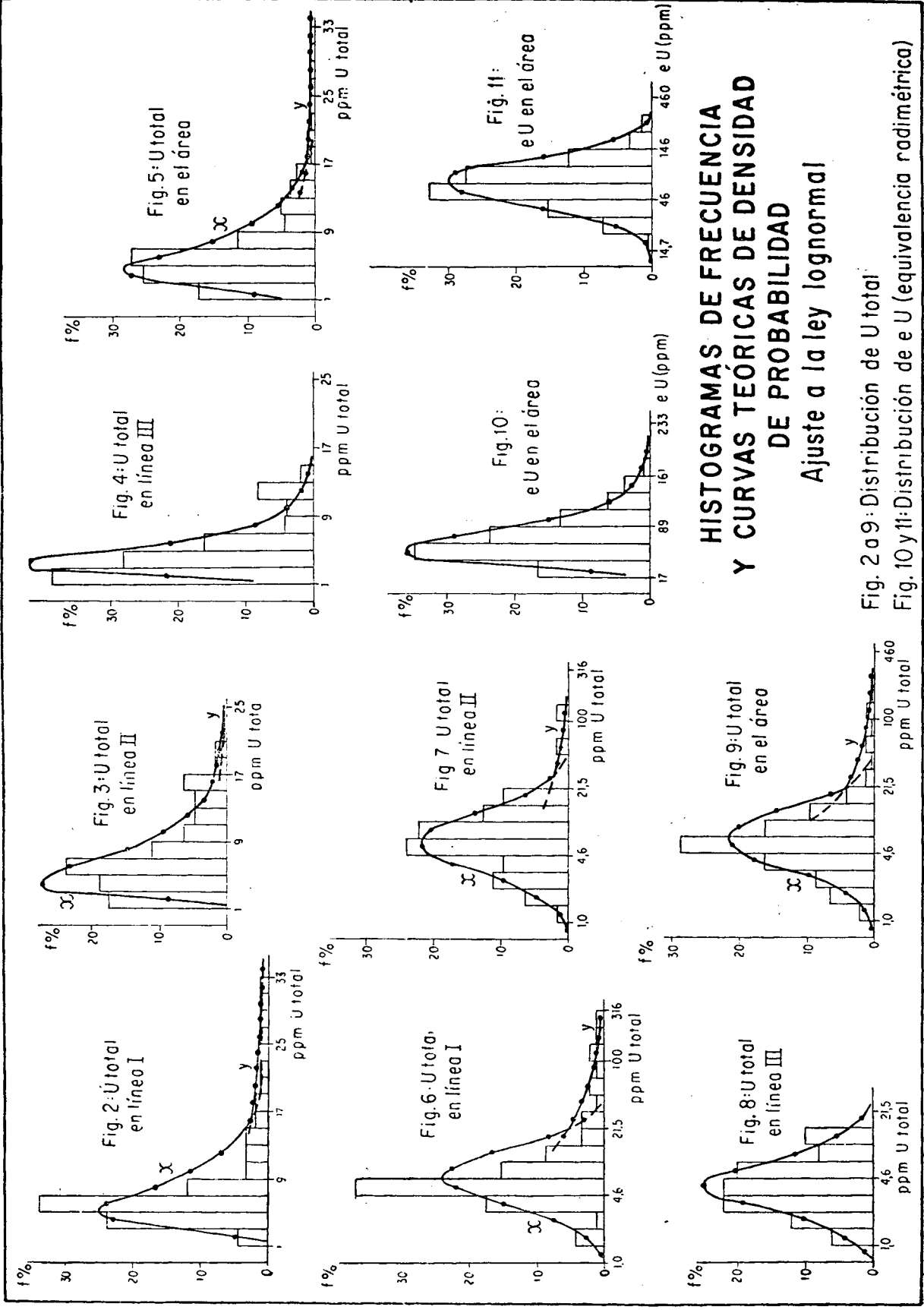
El diagrama de frecuencias acumuladas de la Fig. 12 (escala gauss-logarítmica) muestra una discontinuidad en 93 % aproximadamente, de la escala de frecuencia, correspondiente a un valor de unos 15 ppm U, separando la población de referencia en dos subpoblaciones X e Y, con aproximadamente 93 y 7 %, respectivamente, de la población total.

En general, hay un ajuste aceptable a los valores de referencia de las rectas x e y que representan las dos subpoblaciones (rectas de Henry). La pendiente de x es mayor que la de y , por lo tanto la dispersión de valores de la segunda subpoblación es mayor que la de la primera. Esta relación está claramente destacada por el trazado de las curvas teóricas de densidad de probabilidad correspondientes a las dos distribuciones (Fig. 5). Así es como, a valores más altos de U corresponde una dispersión más fuerte; por otra parte, la extrapolación de X puede dar valores no superiores a 45 ppm U para un 99,9 % de frecuencia acumulada; sin embargo por la extrapolación de Y hasta el mismo valor de frecuencia acumulada llega a 500 ppm U, lo cual pone de manifiesto la *anomalía* de esta subpoblación.

Analizando el valor de los parámetros estadísticos obtenidos, se puede aceptar el ajuste de la población de referencia por una *ley lognormal*. El histograma de frecuencias correspondiente (Fig. 9) muestra un buen ajuste al modelo propuesto.

La exposición anterior es aplicable a las líneas de muestreo I, II y III, consideradas individualmente, según se observa en sus respectivos histogramas de frecuencia y curvas teóricas de densidad de probabilidad (Fig. 2, 3 y 4). Un buen ajuste gráfico puede deducirse de sus histogramas, en los que se consideró la distribución de los valores logarítmicos de uranio total (Fig. 6, 7 y 8). Con respecto a la línea de muestreo IV, el número insuficiente de valores obtenidos invalida un análisis estadístico de la misma.

Los cálculos pertinentes se realizaron por medio del programa "Cálculo de Parámetros Estadísticos" escrito en Fortran IV para la Computadora GE-625, cuyos resultados están resumidos en el cuadro IV.



HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA Y CURVAS TEÓRICAS DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD Ajuste a la ley lognormal

Fig. 2 a 9: Distribución de U total
Fig. 10 y 11: Distribución de e U (equivalencia radimétrica)

CUADRO IV
Parámetros estadísticos

Distribución de valores ppm U					
Muestras de:	n	\bar{x}	s^2	g_1	g_2
Línea I	83	8,5	88,59	4,86	29,72
Línea II	61	7,3	21,54	1,02	0,35
Línea III	50	4,8	11,17	1,31	0,74
Todo el área	202	7,1	47,93	5,58	47,69

Distribución de valores \log_{10} ppm U					
Línea	n	\bar{x}	s^2	g_1	g_2
Línea I	83	0,8150	0,0763	1,02	2,65
Línea II	61	0,7762	0,0829	-0,23	-0,58
Línea III	50	0,5916	0,0771	0,26	-0,74
Todo el área	202	0,7331	0,0915	0,22	0,53

NOTA: La media de los valores logarítmicos corresponde a 6,5 ppm U; 6,0 ppm U; 3,9 ppm U y 5,4 ppm U para las líneas I, II y III y todo el área, respectivamente.

4. 2. *Distribución valores e U (equivalentes radimétricos)*

El conjunto de los valores radimétricos obtenidos para las líneas I, II, III y IV, oscilan entre 17 y 253 ppm e U y dan un valor medio de 73 ppm e U. El respectivo histograma de frecuencias (Fig. 10) muestra una fuerte asimetría positiva; por esa razón el valor más probable (modo estimado \approx 58 ppm e U) es menor que la media aritmética.

El diagrama de frecuencias acumuladas de la Fig. 14 (escala gauss-logarítmica) muestra un excelente ajuste de la recta de probabilidad (recta de Henry) a los valores de referencia. La pendiente de esta recta es mayor que la correspondiente a los valores de uranio fluorimétrico, por lo tanto la dispersión de valores radimétricos es menor. Por otra parte, como los principales elementos emisores β (las familias del Th y del K y la subfamilia del Ra) no son afectados por fenómenos de lixiviación, no existe en este caso una subpoblación de valores anómalos, como en el caso del uranio.

De la extrapolación hasta 0,1 % de frecuencia se obtienen valores no inferiores a 12 ppm e U y de la extrapolación hasta 99,9 % de frecuencia, valores no superiores a 250 ppm e U. Es interesante consignar que la misma extrapolación da 0,6 ppm y 45 ppm respectivamente para la subpoblación de fondo de los valores de U total, en comparación con los 500 ppm U total para la extrapolación hasta 99,9 % de la subpoblación anómala.

Del análisis de los parámetros obtenidos surge el hecho de un buen ajuste de la población empírica de e U a la *ley lognormal* (ver histograma de frecuencias de la Fig. 11, construido para los valores logarítmicos de e U).

5. DISCUSIÓN

La distribución del uranio en rocas graníticas no es homogénea ya que cada mineral o fracción mineralógica contiene proporciones variables del mis-

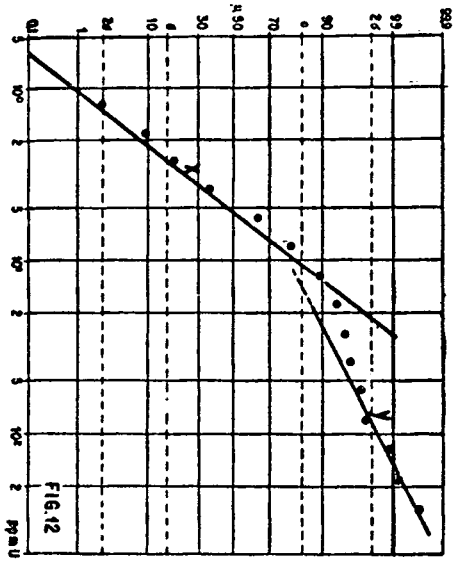


FIG. 12

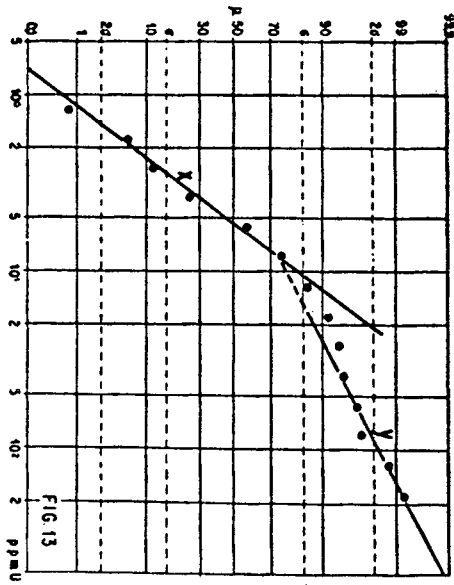


FIG. 13

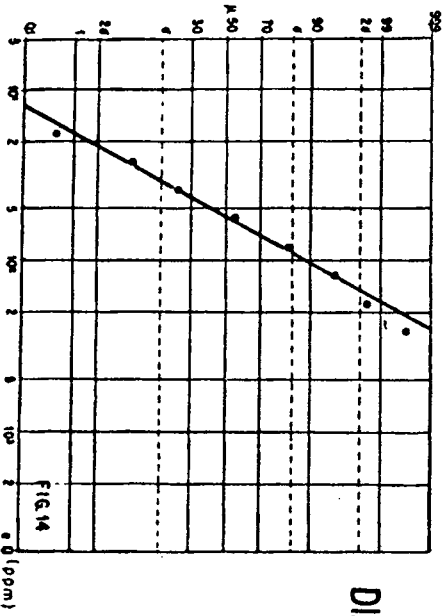


FIG. 14

DIAGRAMAS DE FRECUENCIAS ACUMULADAS

AJUSTE A LA LEY LOGNORMAL

- FIG. 12. U total en el área
- FIG. 13. U total en manifestación "Schoginweil" (líneas I y II)
- FIG. 14. eU en el área

mo y está condicionada por factores geológicos, estructurales y fisicoquímicos. Pese a la complejidad del problema podemos ensayar una agrupación de los modos de presentarse el uranio de acuerdo con los principios de Neuerburg (1955):

- a) *Minerales de U^{+4}* : Son muy raros (uraninita, brannerita, etc.) aunque es probable que existan frecuentes inclusiones submicroscópicas de los mismos en minerales esenciales de rocas graníticas.
- b) *Minerales de UO_2^{++}* : Más frecuentes que los anteriores (fosfatos, ciertos óxidos, etc.).
- c) *Uranio de las estructuras minerales*: Iones U^{+4} pueden encontrarse diseminados en el retículo cristalino de diversos minerales accesorios de plutonitas (circón, monacita, xenotima, esfena, allanita, apatita, etc.) fenómeno facilitado por la similitud de su radio iónico $-1,05 \text{ \AA}$ con el del Th^{+4} , Y^{+3} , Ca^{+2} y la mayor parte de las tierras raras (Hurley y Fairbairn, 1957).
- d) *Uranio en minerales de alteración*: Al estado hexavalente, el uranio puede encontrarse en posición de intercambio iónico en el caolín y minerales de la arcilla, productos de alteración de los feldespatos.
- e) *Uranio adsorbido*: De Vore (1955) demostró un fenómeno previamente observado por Brown *et al.* (1953) que consiste en la concentración de uranio, al estado hexavalente, en la película intergranular de los cristales de las rocas graníticas. Así se explica cómo buena parte de la radioactividad de la superficie de cristales se debe a los productos de desintegración allí adsorbidos (Hurley, 1950). Goñi (1967) ha descrito un proceso de adsorción de uranio por geles de óxido de titanio, producto de alteración de esfenas.

A través de estas consideraciones el uranio de las plutonitas aparece bajo los estados de oxidación U^{IV} y U^{VI} , que se diferencian sustancialmente entre sí por sus propiedades geoquímicas. En efecto, el U^{IV} , presente fundamentalmente en la red de silicatos o precipitado como óxido, es prácticamente insoluble; geoquímicamente se asocia a Th, Ti y tierras raras. Por su parte el U^{VI} , que no existe sino como catión uranilo (UO_2^{++}), entra a formar parte de grupos aniónicos complejos de la forma $[(UO_2)(XO_n)_2]^{-2}$ y $[(UO_2)(XO_n)_3]^{-4}$ muy solubles y extremadamente móviles. El UO_2^{++} nunca entra en sustitución de otros cationes en la red de los silicatos debido a su forma peculiar y su tamaño (1,4-3,4 Å). Se separa del Th en el ciclo de oxidación y se asocia geoquímicamente a otros elementos muy móviles (Co y Cu). Como sus complejos carbónicos y sulfúricos son muy sensibles a cambios en las condiciones fisicoquímicas del medio, precipita por variaciones de pH, Eh o presencia de PO_4^{-3} , reacción regulada por la presión parcial de CO_2 en las soluciones.

La sucinta exposición precedente destaca sólo algunos principios fundamentales para una interpretación correcta de la distribución del uranio en plutonitas, estudiada por medio de una serie de resultados analíticos que se han agrupado y valorado estadísticamente.

Esta valorización de los datos que forman la población empírica (población de referencia) nos lleva a admitir que la distribución del uranio puede ser interpretada como una mezcla de dos componentes cuyas medianas, tanto como las proporciones relativas de cada una, son muy diferentes. En efecto,

a la componente de mediana menor corresponde la mayor proporción relativa, por consiguiente la mediana general está siempre próxima a esta misma subpoblación.

En el diagrama de frecuencias acumuladas de la Fig. 13 (líneas de muestreo I y II, sobre la manifestación Schlagintweit) la primera subpoblación X, tiene una mediana de 5,5 ppm U. A través del mismo vemos que los valores superiores a 20 ppm U ($x + 2s$) pueden considerarse como *significativamente anómalos* ($P = 95,5\%$) dentro de una distribución lognormal.

Si se admite en principio, para la roca granítica fresca, una distribución más o menos homogénea de los contenidos uraníferos, sean éstos muy bajos, como el caso del macizo de Khantass, Kazakhstan, donde una treintena de muestras dan una media de 2,4 ppm U (Leonova y Renne, 1964), o sean relativamente elevados como en el caso del macizo de Saint-Sylvestre, Limousin, Macizo Central francés con valores prácticamente constantes entre 20 y 22 ppm U (Ranchin, 1968), se advierte en nuestro caso (anomalía Schlagintweit) que la reiteración de valores superiores a 20 ppm U formando otra subpoblación, sólo puede ser posible por un *proceso de redistribución* de los contenidos primitivos. En general, estos procesos de redistribución están íntimamente asociados a fenómenos de alteración de la roca.

El comportamiento del uranio en rocas graníticas frente a fenómenos de alteración es bien conocido. En roca fresca, a cierta profundidad, una proporción importante del uranio puede estar bajo la forma de uranita (pechblenda), normalmente inestable en una zona de alteración (Hamilton, 1958; Coulomb, 1959; Jurain, 1962; Nicolli, 1966). Por meteorización los minerales constitutivos de la roca pueden ser completamente transformados en productos de alteración. En tales condiciones el uranio liberado puede ser retenido en las fisuras por dichos productos de alteración, en la zona de interfase de minerales o de fragmentos rocosos, pero normalmente la mayor parte del uranio es removido por soluciones en forma de iones complejos. Es preciso entonces considerar el importante papel de microcantidades de sulfuros presentes en la roca, que por oxidación pueden dar lugar a la liberación de iones $SO_4^{=}$ que en medios ácidos (pH 1,5 a 4,0) forman complejos tales como $[UO_2(SO_4)_2]^{-2}$ y $[UO_2(SO_4)_3]^{-4}$. De igual manera adquiere gran importancia el anhídrido carbónico, que da soluciones acuosas ácidas y que se combina con el ión UO_2^{++} para dar las especies complejas $[UO_2(CO_3)_2 \cdot 2H_2O]^{=}$, estable entre pH 4,5 y 6,5 y $[UO_2(CO_3)_2]^{-4}$, estable hasta pH 11 (Chervet y Coulomb, 1958).

Estos procesos han tenido fundamental importancia en el macizo de Los Gigantes, ya que la alteración de los afloramientos graníticos es muy intensa (¿procesos hidrotermales?). Por otra parte es interesante destacar el empobrecimiento en uranio de los afloramientos al oeste de las anomalías radimétricas desde donde, probablemente por medio de soluciones descendentes, ha migrado hacia el este, siguiendo el sentido general de la pendiente topográfica. Es importante destacar también que las muestras situadas sobre las anomalías radimétricas *no son las de más alto contenido uranífero* (ver cuadro III) ya que *los valores mayores se encuentran desplazados hacia el E*, en la zona de densificación del muestreo (ver Fig. 15, línea I).

Todos estos fenómenos de intensa lixiviación han influido para separar en este ciclo el uranio del torio al cual se hallaba primitivamente vinculado. En efecto, la solubilidad de los compuestos de UO_2^{++} y su gran movilidad contrastan con las de Th cuyos minerales, por lo general, son prácticamente insolubles y por tanto muy poco móviles.

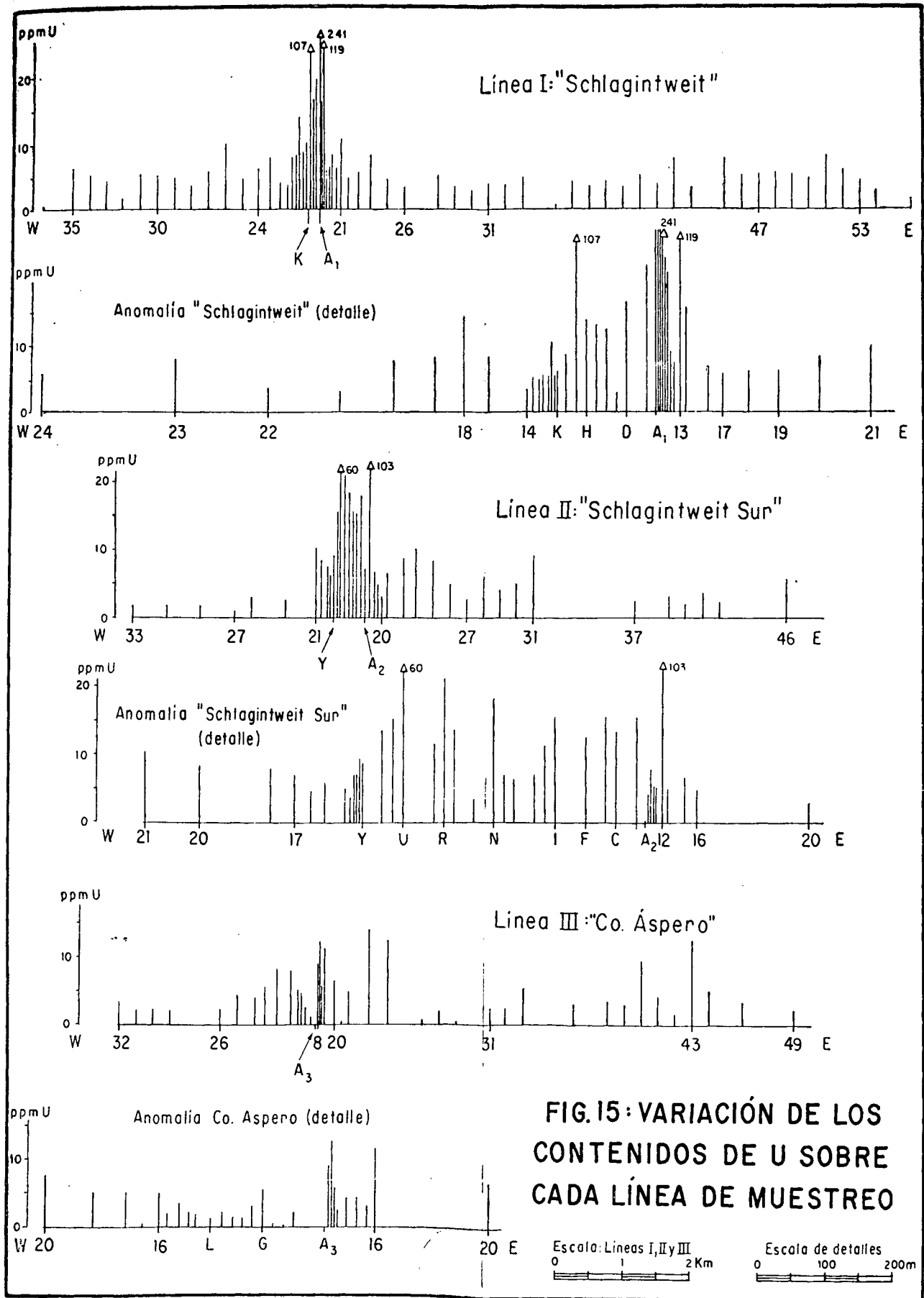


FIG.15: VARIACIÓN DE LOS CONTENIDOS DE U SOBRE CADA LÍNEA DE MUESTREO

Escala: Líneas I, II y III
0 1 2 Km

Escala de detalles
0 100 200m

Por esta razón no son de extrañar los siguientes fenómenos vinculados a estos procesos:

- a) El fuerte desequilibrio observado entre los valores de U total (obtenidos por fluorimetría) y los equivalentes de uranio radimétrico (en general $U_{total}/e U = 0,13$).
- b) El desplazamiento de la anomalía uranífera al este de la anomalía radimétrica.

En el punto a) se debe señalar no sólo la probable incidencia de la familia del Th, sino la presencia *residual* de productos de desintegración de la familia del U.

En la familia del torio, encabezada por el isótopo Th_{90}^{232} , la actividad γ está dada por la presencia de $MsTh_{90}$, ThC y ThC'' . Estos dos últimos son los principales emisores β de su serie (Hurley, 1956; Jurain, 1962).

Cuando la familia uranio-radio está en equilibrio, la actividad γ se reparte muy desigualmente entre sus dos subfamilias. El Ra C y el Ra B, pertenecientes a la segunda subfamilia representan el 83 % y el 14 %, respectivamente, de la actividad γ total de la familia y tan solo el 2,1 % de dicha actividad corresponde a la subfamilia del uranio (H. B. Nicolli, 1966). La emisión β está dada principalmente por Ux_2 , Ra C, Ra C'' y Ra E. (Hurley, 1956).

Resulta también muy importante considerar la influencia del K ya que este elemento se halla fuertemente concentrado en minerales esenciales de rocas graníticas: feldespatos alcalinos (que contienen alrededor de 15 % de K:O y micas (con aproximadamente un 10 % de K:O). En efecto, el isótopo radiactivo K_{19}^{40} presente en un 0,012 % del elemento natural, se desintegra por dos vías: un 11 % da A_{18}^{40} por captura K con emisión γ y el 89 % da Ca^{40} por emisión β (Coulomb, 1958).

Es interesante conocer el *equivalente en equilibrio*, de cada una de las familias emisoras γ . Si bien hay opiniones controvertidas al respecto y se dan distintos valores que, en general, dependen fuertemente de las condiciones experimentales, se puede aceptar el empleo de la simple relación $K/Th/U = 1/2000/4000$, propuesta por Ponsford (1955).

Si el equilibrio se rompe, por movilización de U^{VI} , fácilmente lixiviable en zonas superficiales de alteración, estas relaciones se modifican sustancialmente, ya que el *Th y sus productos hijas*, así como los *productos de desintegración del uranio son casi insolubles* y en consecuencia *muy poco móviles geoquímicamente*.

Se comprueba que los procesos anteriormente descritos tienen lugar en los afloramientos graníticos de Los Gigantes, ya que el examen de la población de referencia de los valores eU (análisis radimétrico), sea a través de los respectivos histogramas de frecuencia (fig. 10 y 11) o a través de los diagramas de frecuencia acumulada (Fig. 14) así lo prueba. En efecto hay un excelente ajuste de los valores radimétricos a la ley lognormal, lo que revela la existencia de *un solo proceso de distribución de la mayor parte de los isótopos radiactivos*, principalmente emisores β (Familias del K y del Th y subfamilia del Ra).

No ocurre así con el *uranio*, pues se reitera que en su distribución, *al intervenir más de un fenómeno de regulación de su concentración*, da lugar a una *subpoblación de fondo* (la subpoblación principal) y una serie de valores de

referencia que en conjunto forman una segunda *subpoblación de anomalías uraníferas*, producto de la redistribución del elemento.

El punto b) referido al desplazamiento de la anomalía uranífera hacia el este, requiere algunas consideraciones. Deben existir factores de control de la dispersión del uranio, pues de lo contrario éste se hubiese extendido desde la zona de anomalías en todas las direcciones (y por tanto también hacia el este) con decrecimiento paulatino de su contenido hasta valores normales para la roca de campo. Lo que se observa en la Fig. 15 en cambio, es que los valores más altos se circunscriben entre el borde de la anomalía y unos 300 m al este de la misma.

Al respecto, la serie de estructuras diédricas mencionadas en el apartado 1.2., actuaron como trampas en el proceso de depositación a partir de soluciones descendentes originándose las acumulaciones uraníferas más importantes del distrito.

Se observó la presencia de *autunita* $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2 \cdot (\text{PO}_4)_2 \cdot 10-12 \text{H}_2\text{O}$, y *meta-autunita* $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2 \cdot (\text{PO}_4)_2 \cdot 2-6 \text{H}_2\text{O}$, identificada por medio de diagramas de polvo por rayos X (método de Debye-Scherrer) en muestras de línea I (Schlagintweit) como una pátina en fracturas y diaclasas, en las muestras 3E, 5E, 6E, 12E y menos abundante en las muestras 2E, 4E, 8E y 9E, donde se observaron sólo cristales dispersos.

Dado que el ión PO_4^{3-} en medios ácidos o neutros actúa como un importante agente de precipitación del UO_2^{++} y puesto que en una decena de muestras analizadas se observa un aumento del contenido de P_2O_5 al aumentar el U, se considera que el fósforo puede tener fundamental importancia en el proceso. En efecto, el Cuadro V presenta, para valores de U superiores a 10 ppm, contenidos de P_2O_5 que llegan hasta 0,34 %, 0,39 % y 0,41 %; es una excepción la muestra LG. II. U con 60 ppm U que sólo contiene 0,24 % P_2O_5 . Para el resto de las muestras (entre 5,3 y 1,6 ppm U) se obtienen valores constantes de P_2O_5 (entre 0,25 y 0,27 %). Este conjunto parece mostrar la existencia de una correlación (a ser estudiada en un próximo trabajo) entre los contenidos de U y P_2O_5 .

CUADRO V

Comparación entre contenidos de uranio y fósforo

Muestra N°	ppm U	P_2O_5 %	Muestra N°	ppm U	P_2O_5 %
LG. I. 13E	119	0,39	LG. I. 30W	5,3	0,25
LG. I. 3E	89	0,24	LG. II. 9E	5,0	0,27
LG. II. U	60	0,34	LG. I. 21W	3,9	0,27
LG. II. I	15,4	0,41	LG. I. 29E	3,7	0,25
LG. II. 24E	10,3	0,25	LG. II. 31W	1,6	0,25

En general los valores de P_2O_5 en el cuadro V son considerablemente más altos que los señalados por la bibliografía como valor medio de rocas ígneas —0,27 % P_2O_5 (Conway, 1945)— de granitos y granodioritas, —0,19 - 0,20 % P_2O_5 (Daly, 1933)— y de granitos ricos en potasio —0,18 % P_2O_5 (Sahama, 1945)—.

6. CONSIDERACIONES FINALES

De la exposición precedente surgen las siguientes evidencias:

- El ambiente estudiado corresponde petrológicamente al de una provincia granítico-diasquistífera y, por tanto, carente de toda penetración porfírica. La roca dominante es un granito microclínico, porfiroide, muy alterado; el único aporte ígneo postplutónico es el pegmatítico.
- En el área estudiada predomina un sistema subparalelo de fajas de deformación rumbo NNO-SSE de naturaleza compresiva; las fallas de carácter inverso dan el perfil en escalones de la Sierra Grande de Córdoba, ocupando las masas graníticas los peldaños más elevados.
- Un segundo juego de fracturas compresivas determina con el primero una serie de estructuras diédricas que actuaron como trampas en el proceso de depositación del uranio.
- El intenso diaclasamiento de las masas graníticas tiene características propias en cada sector y desempeña un importante papel como control de penetraciones pegmatíticas.
- El análisis estadístico de la distribución del U total y del e U (valores radimétricos) muestra un buen ajuste a la distribución lognormal.
- El U total muestra una subpoblación principal (fondo) con un valor más probable de 4,9 ppm U y una dispersión fuerte, y una serie de valores mayores de 20 ppm U que forman una segunda subpoblación (anomalías) con una dispersión muy fuerte.
- El e U (valores radimétricos) muestra un buen ajuste a una sola recta de Henry, con un valor más probable de 58 ppm e U y una dispersión menor que para el U total.
- El valor medio de la relación $U \text{ total}/eU = 0,13$ demuestra la existencia de un fuerte desequilibrio para toda el área, en especial aquellas con contenidos de U total más bajos.
- Este desequilibrio está causado por procesos de lixiviación del uranio que afectaron en especial los sectores occidentales del área estudiada y están facilitados por la intensa alteración de toda la estructura.
- Las soluciones descendentes de U^{VI} se depositaron en áreas circunscriptas al E de las anomalías radimétricas, actuando como control factores de carácter estructural (estructuras diédricas, diaclasas) y otros de carácter geouímico (presencia de ión PO_4^{-3}).
- Es importante el papel desempeñado por el ión PO_4^{-3} en el área, como lo pruebo la presencia de autunita y meta-autunita en algunas fracturas y diaclasas y los altos contenidos de P_2O_5 coincidentes con valores altos de U total.

La evaluación de estos resultados requiere, para una correcta aplicación de los mismos a otras áreas graníticas, el estudio de una serie de datos complementarios. Por esta razón se sugiere la continuación de las investigaciones de acuerdo al siguiente esquema de trabajo:

- Estudiar la distribución del P_2O_5 en el área y su probable correlación con los valores de U total.
- Estudiar la distribución del K_2O en el área y su correlación con los valores de e U (equivalentes radimétricos).
- Seleccionar una serie de muestras para la determinación de Th y Ra y de la relación U fijo/U móvil.
- Ampliar el sector del muestreo hacia el sur del río Malambo y completar los análisis de las muestras de la línea IV.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dejar constancia de su agradecimiento: a los Dres. Pedro N. Stipanovic, Félix Rodrigo, Carlos T. C. J. Friz, Carlos G. Martínez y Angel M. O. Santomero, por el interés manifestado en el desarrollo del trabajo; al personal de la División Centro, en especial al Dr. José D. Diez por su colaboración en las tareas de muestreo; a los Dres. Milena González y Roberto O. Toubes, así como al personal de la División Estudios Especiales por las facilidades otorgadas en el desarrollo de la parte experimental y a la Dra. Clara E. Mattei, del Departamento Reactores por su colaboración en el uso del programa de computación "Cálculo de Parámetros Estadísticos", por ella elaborado.

LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- AHRENS, L. H. 1953. *A fundamental law of geochemistry*. Nature 172, 1148.
- AHRENS, L. H. 1954a. *The lognormal distribution of the elements*. Geochim. Cosmochim. Acta 5, 49-73.
- AHRENS, L. H., 1954b. *The lognormal distribution of the elements. II*. Geochim. Cosmochim. Acta 6, 121-131.
- AHRENS, L. H. 1957. *Lognormal - type distribution - III*. Geochim. Cosmochim. Acta 11, 205-212.
- AHRENS, L. H., 1963a. *Lognormal type distributions in igneous rocks. IV*. Geochim. Cosmochim. Acta 27, 333-343.
- AHRENS, L. H., 1963b. *Element distribution in igneous rocks. V*. Geochim. Cosmochim. Acta 27, 877-890.
- AHRENS, L. H. 1963a. *Element distributions in igneous rocks. VI. Negative skewness of SiO₂ and K*. Geochim. Cosmochim. Acta 27, 929-938.
- AHRENS, L. H., 1964. *Element distributions in igneous rocks. VII. A reconnaissance survey of the distribution of SiO₂ in granitic and basaltic rocks*. Geochim. Cosmochim. Acta 28, 271-290.
- AHRENS, L. H., 1966. *Element distributions in specific igneous rocks. VIII*. Geochim. Cosmochim. Acta 30, 109-122.
- ANZULOVICH, J. C., 1967 a. *La prospección general en el faldeo oriental de la Sierra Grande (Los Gigantes - Río Malambo) Córdoba*. Inf. RM-C-C - 41 CNEA, Inédito.
- ANZULOVICH, J. C., 1967 b. *Prospección detallada de la manifestación nuclear "Schlagintweit" Sierra de Los Gigantes, Prov. de Córdoba*. Inf. RM-C-C-42 CNEA, Inédito.
- BERTHOLLET, P., 1958. *Méthodes d'Analyses utilisées par la Section de Géochimie*. Note C. E. A. N° 250, París.
Rapport C. E. A. R-3557. París.
- BERTHOLLET, P., 1968. *Méthodes d'Analyses utilisées par la Section de Géochimie*. Rapport C. E. A. R-3557. París.
- BROWN, H.; BLAKE, W. J.; CHODOS, A. A.; KOWALKOWSKI, R.; MC KINNEY, C. R.; NEUERBURG, G. J.; SILVER, L. T. and UCHIYAMA, S., 1953. *Leaching studies of interstitial material in igneous rocks (res.)* Bull. Geol. Soc. Am. 64, 1400-1401.
- CONWAY, E. J., 1945. *Mean losses of Na, Ca, etc., in one weathering cycle and potassium removal from the ocean*. Am. J. Sci. 243, 583.

- COULOMB, R., 1958. *Radioactivité du batholite d'Elbema (Hoggar). Corrélations statistiques entre les rayonnements et la composition chimique des granites.* Bull. Soc. franç. Minér. Crist. LXXXI, 227-234.
- COULOMB, R., 1959. *Contribution a la géochimie de l'Uranium dans les granites intrusifs.* (Tesis doct., Fac. Ciencias, Univ. Paris). Publ. Comm. a l'Energie Atomique. Rapport C. E. A. N° 1173, Paris.
- COULOMB, R. et GOLDSTEIN, M., 1956. *Recueil de méthodes de dosage de l'Uranium utilisées en Géochimie.* Note C. E. A. N° 156, Paris.
- CHEVET, J. et COULOMB, R., 1958. *Comportement géochimique de l'Uranium dans le cycle d'altération.* 2ème. Conférence sur l'utilisation pacifique de l'Energie atomique, 15-P-1250, Geneve.
- DALY, R. A., 1933. *Igneous rocks and the depths of the earth.* New York and London.
- DEVORE, G. W., 1955. *The role of adsorption in the fractionation and distribution of elements.* J. Geol. 63, 159-190, 417-494.
- GAMBA, J. L. y COCO, L. A., 1967. *Levantamiento radimétrico aéreo Los Gigantes-Copina (Córdoba).* Inf. RM-C-C-36 CNEA, Inédito.
- GOÑI, J., 1966. *Contribution a l'étude de la localisation et de la distribution des éléments en traces dans les minéraux et les roches granitiques.* Mém. B.R.G.M., N° 45, Paris.
- GORDILLO, C. E. y LENCINAS, A., 1969. *Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis.* 1er. Simp. Geol. Reg. Arg., Ac. Nac. Ciencias de Córdoba. Inédito.
- GROSS, C., 1948. *Cuadro tectónico del valle de Punilla.* Rev. Asoc. Geol. Arg. III, 73-132.
- GY, P., 1954. *L'échantillonnage des minerais. Erreur commise dans le prélèvement d'un échantillon sur un lot de minerai.* Revue Ind. minér. Sect. A, 35, 311-345.
- HAMILTON, E. H., 1958. *Distribution of radioactivity in rocks and minerals and the effect of weathering on determination of uranium in granites.* Nature 181, 697-698.
- HURLEY, P. M., 1950. *Distribution of radioactivity in granites and possible relation to helium age measurements.* Bull. Geol. Soc. Amer. 61, 1-8.
- HURLEY, P. M., 1956. *Direct radiometric measurement by gamma-ray scintillation spectrometer.* Part I: uranium and thorium series in equilibrium. Part II: uranium, thorium and potassium in common rocks. Bull. Geol. Soc. Amer. 67, 395-404 y 405-412.
- HURLEY, P. M. and FAIRBAIRN, H. W., 1957. *Abundance and distribution of uranium and thorium in zircon, sphene, apatite, epidote and monazite in granite rocks.* Trans. Amer. Geophys. Union Fr., 38 (6), 939-944.
- JEMMA, R. J. A., 1965. *Informe sobre la Comisión de Servicio a "Los Gigantes", Pcia. de Córdoba, realizada entre el 16 de noviembre y el 22 de diciembre de 1965.* Inf. Div. Geof. CNEA, Inédito.
- JEMMA, R. J. A., 1966. *Prospección geofísica de las manifestaciones nucleares "Los Europeos" y "La Mesada" en la Sierra de Los Gigantes, Pcia. de Córdoba.* Inf. Div. Geof. CNEA, Inédito.
- JONES, M. P. and BEAVEN, C. H. J., 1971. *Sampling of non-Gaussian mineralogical distributions.* Instn. Min. Metall. Sect B. 80, B316-B323.
- JURAIN, G. 1962. *Contribution a la connaissance géochimique des familles de l'Uranium-radium et du thorium dans les Vosges Méridionales. Application de certains résultats en prospection des gisements d'Uranium.* (Tesis Doct. Fac. Ciencias, Univ. Nancy) Rapport C.E.A. N° 2154, Paris.
- LAFITTE, P., 1957. *Introduction a l'étude des roches métamorphiques et de getes métallifères.* Masson, Paris.
- LEONOVA, L. L. and RENNE, O. S., 1964. *Distribution of uranium, thorium and potassium in homogeneous granitoids of the Susamyr Batholith.* Geokhimiya N° 8, 788-794 (Geochem. Int. 4, 755-781).
- LINARES, E. y RINALDI, C., 1967. *Estudio preliminar mineralógico-petroológico del área de los yacimientos "Los Europeos" y "Schlagintweit", Los Gigantes, pcia. de Córdoba.* Inf. CNEA, Inédito.
- LINARES, E. y LATORRE, C., 1968. *Informe N° 94-68, CNEA, Inédito.*
- LUCERO, H. N., 1969. *Información preliminar sobre los resultados de la aplicación parcial del Plan Integral (Distrito Los Gigantes) Córdoba.* Inf. CNEA, Inéd.
- LUCERO, H. N. y RINALDI, C., 1972. *Consideraciones petrológicas y estructurales sobre el faldeo oriental de la Sierra de "Los Gigantes", Córdoba.* Inf. CNEA, Inédito.
- NEUERBURG, G. J., 1955. *Uranium in igneous rocks of the United States.* U. S. geol. surv. Prof. Pap. 300, 55-64.
- NICOLLI, H. B., 1966. *Estudio de la geoquímica del uranio en rocas graníticas españolas.* Tesis Doct. Fac. Ciencias, Univ. Salamanca.
- NICOLLI, H. B., 1969. *Distribución estadística de elementos en rocas graníticas.* Rev. Asoc. Geol. Arg. XXIV, 139-157.

- NICOLLI, H. B., 1970. *Análisis estadístico de la distribución de elementos en rocas graníticas*. Bol. Acad. Nac. Ciencias Córdoba, XLVII, 273-281.
- PASTORE, F., 1932. *Hoja 20 i del Mapa Geológico de la Rep. Argentina*. Bol. N° 36. *Relevamiento geológico y explicación*. Dir. Gral. de Minería, Buenos Aires.
- PONSFORD, D. R. A., 1955. *Radioactivity studies of some british sedimentary rocks*. Bull. of Geol. of Great Britain 10, 24-44.
- RAGUIN, E., 1957. *Géologie du granite*, 2ª ed., Masson, París.
- RANCHIN, G., 1968. *Contribution a l'étude de la répartition de l'uranium a l'état de trace dans les roches granitiques saines. Les granites a teneur élevée du massif de Saint Sylvestre (Limousin-Massif Central français)*. Sc. de la Terre XIII, 159-205.
- RODIONOV, D. A., 1965. *Distribution functions of the element and mineral contents of igneous rocks*. (Trad. del ruso). Consultant Bureau, N. York.
- ROOKE, J. M., 1964. *Element distribution in some acid igneous rocks of Africa*. Geochim. Cosmochim. Acta 28, 1187-1197.
- SAHAMA, Th. G., 1945. *On the chemistry of the east Fennoscandian rapakivi granites*. Compt. rend. Soc. Géol. Finlande 18; Bull. Comm. géol. Finlande 136, 15.
- SHAW, D. M., 1961. *Element distribution laws in geochemistry*. Geochim. Cosmochim. Acta 23, 116-134.
- TOSSELLI, A., 1969. *Comunicaciones verbales* (Fac. Ciencias Ex. Fis. y Nat., Univ. Nac. Córdoba).