

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MUSEO

REVISTA DEL MUSEO DE LA PLATA

(NUEVA SERIE)

IX

Geología 74

ESTUDIO ESTADISTICO DE ELEMENTOS TRAZA EN EL BASAMENTO IGNEO-METAMORFICO DE LA SIERRA DE QUILMES

JULIO C. MERODIO * y CARLOS W. RAPELA * **

ABSTRACT

The statistical nature of the distribution of trace elements (Li, Rb, Sr, Ba, Cu and Zn) and element relationships (K/Rb, K/Sr, Rb/Sr y Ca/Sr) in 88 samples from the igneous-metamorphic basament of Sierra de Quilmes has been considered. With the exception of barium which shows a polymodal pattern, all other trace elements tend to approach the lognormal law in the granitoid rocks, whereas different distribution models (normal, lognormal, bimodal) have been found in the metamorphic rocks.

The study of the element relationship distributions suggest that the ratio of two populations of similar pattern defines a daughter (distribution) similar to its parent model. If one of the parent populations had polymodal distribution, the daughter could accept either the normal or lognormal law as well as negative skewness.

The petrological significance of the distributions has been considered at the light of recent geochemical studies in the area.

INTRODUCCION

El conocimiento de los parámetros estadísticos de los elementos traza en rocas genéticamente asociadas es de fundamental importancia. En el campo de las rocas granitoides, por ejemplo, el estudio de sus distribuciones es particularmente útil. En una secuencia de rocas graníticas la diferencia en composición de elementos mayoritarios entre las diferentes fases, es mínima; en cambio los tenores de elementos traza suelen diferir críticamente.

En general, la variación relativa de elementos traza es mucho mayor que la de los elementos mayoritarios. Como consecuencia de ello, el grado de diferenciación y la acidez son mucho mejor indicados por la variación de aquéllos. A este respecto elementos como rubidio, estroncio, bario, cobalto y níquel, algunas de cuyas distribuciones se analizan en este trabajo, han resultado particular-

(*) Instituto de Mineralogía, Petrología, Sedimentología y Geoquímica (I.M.P.S.E.G.). Universidad Nacional de La Plata.

(**) Carrera del Investigador Científico, CONICET.

mente útiles como indicadores de diferenciación y del orden de intrusión de las diferentes fases que pueden componer un cuerpo complejo. Asimismo, para resolver problemas petrológicos de este tipo se acude también al auxilio de ciertas relaciones entre elementos minoritarios y mayoritarios combinados (Taylor, 1965) como por ejemplo K/Rb , K/Sr , Rb/Sr , y Ca/Sr , que también se estudian ahora.

Rooke (1964) ha afirmado que las formas de distribución de una subpoblación no necesariamente tienen que ser las mismas que el conjunto global o de otros miembros del grupo. Es razonable suponer —concluye este autor— que por ejemplo, granitos que tienen diferentes modos de origen diferirán en sus modelos de distribución; inclusive considera que puede presentarse esta misma posibilidad en grupos de diferentes edades geológicas.

La toma de muestra constituye una de las etapas fundamentales en un estudio de naturaleza estadística. Es evidente que su significación es relevante en cualquier tipo de investigación que se lleve a cabo, pero en estos casos adquiere importancia capital por su influencia considerable en las formas de distribución, especialmente donde ocurren anomalías regionales.

Ahrens (1966) estima que el tamaño de las muestras debe ser proporcional al volumen de las diferentes variedades composicionales que caracterizan a un área geológica determinada. Considera este autor que si bien los elementos que presentan distribuciones con asimetría positiva o negativa bien definidas no pueden cambiar con otro modo de muestreo, sí podrían hacerlo aquellas poblaciones con modelos caracterizados por ligeras asimetrías.

La bibliografía consultada muestra un número no muy elevado de investigadores que se han ocupado de estudiar las leyes de distribución que siguen los elementos minoritarios en los distintos tipos de roca. Ahrens (1966) presenta una tabla muy útil donde resume la información estadística disponible hasta esa época de la distribución de los contenidos de elementos mayoritarios y traza en rocas ígneas. Ella muestra que no más de una veintena de investigadores distribuidos en los distintos centros mundiales se han ocupado del tema. Asimismo no se conoce antecedente alguno respecto a estudios de este tipo realizados con relaciones de contenidos de elementos minoritarios entre sí y mayoritarios combinados.

Una revisión de la tabla-resumen indica también que los elementos minoritarios presentan una distribución que se adapta de preferencia a la ley lognormal. La información, centrada exclusivamente a modelos estadísticos que se presentan en rocas ígneas, nada contiene respecto a rocas metamórficas.

El presente trabajo tiene por finalidad determinar los modelos de distribución de los elementos traza rubidio, estroncio, bario, cobre y cinc y de las relaciones K/Rb , K/Sr , Rb/Sr y Ca/Sr en 57 muestras de rocas granitoides y 31 metamórficas de la Sierra de Quilmes (Sierras Pampeanas, Prov. de Salta).

En un trabajo anterior (Merodio y Rapela, 1979) se analizaron estadísticamente los contenidos de elementos mayoritarios en el área de estudio. Se establecieron los modelos de distribución de sus valores y se concluyó con un análisis de los factores que controlan el tipo de distribución que sugirió que las condiciones físicas y fisicoquímicas propias de los procesos petrogenéticos han sido en gran parte responsables de los tipos de distribución observados. Cobre y cinc

fueron objeto de un estudio estadístico parcial basado solamente en histogramas y curvas de frecuencia acumuladas que impidieron definir los modelos de distribución (Merodio y Rapela, 1975).

Las características geológicas, petrológicas y geoquímicas de las rocas que conforman el llamado basamento metamórfico de la Sierra de Quilmes, objeto del presente estudio, han sido expuestas en sucesivas contribuciones de uno de los autores y colaboradores (Rapela, 1976a, 1976b, Toselli, Toselli y Rapela, 1978, Rapela y Shaw, 1979) a los que se refiere a los efectos de la discusión de los resultados.

El comportamiento petrológico de rubidio y estroncio en el área de estudio fue analizado recientemente a la luz de modernas metodologías de modelos matemáticos (Rapela y Shaw, 1979). La identificación de los procesos ígneos actuantes mediante expresiones matemáticas que cuantifican los equilibrios sólido-líquido de elementos traza, permitieron inferir características de la génesis, especialmente de la evolución granítica que trascienden el área de estudio. Particularmente importante a los fines del presente trabajo fue la comprobación de que la mayor unidad granitoide del área, de dimensiones batolíticas (Granito Cafayate) observa tendencias evolutivas compatibles con un modelo de cristalización fraccionada a partir de un magma granodiorítico, que determina trayectorias en la distribución de rubidio y estroncio que observan notablemente la ley exponencial de Rayleigh. A similares conclusiones se arribaron recientemente en estudios geoquímicos de rocas graníticas sudafricanas (McCarthy y Hasty, 1976; McCarthy y Robb, 1978).

En este punto, resulta tentadora y hasta inevitable la idea de vincular el hecho mencionado anteriormente de las tendencias a la distribución lognormal que se observan en los elementos traza de secuencias ígneas, con el hecho de que el comportamiento de elementos traza diadócicos observan fraccionamientos exponenciales durante la cristalización de los magmas. La gran complejidad del problema, con numerosas variables, no anticipa sin embargo soluciones fáciles para este importante problema geoquímico.

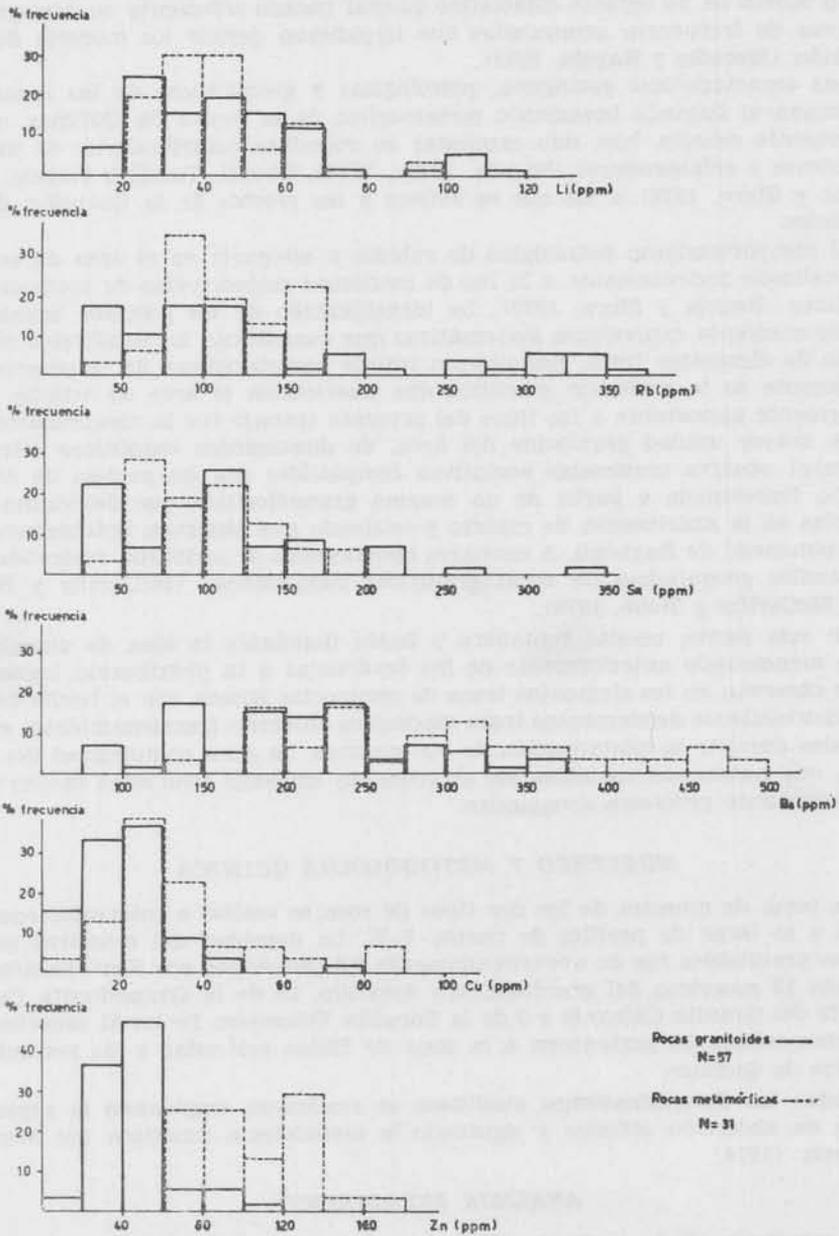
MUESTREO Y METODOLOGIA QUIMICA

La toma de muestra de los dos tipos de roca se realizó a intervalos equidistantes a lo largo de perfiles de rumbo E-W. La densidad del muestreo en los cuerpos granitoides fue de aproximadamente 0,5 individuos por Km², habiéndose obtenido 12 muestras del granito Cerro Amarillo, 13 de la Granodiorita Cuchiyaco, 23 del Granito Cafayate y 9 de la Tonalita Tolombón. De los 31 especímenes de metamorfitas, 15 pertenecen a la zona de filitas moteadas y las restantes a la Sierra de Quilmes.

Todas las determinaciones analíticas se realizaron empleando la espectrometría de absorción atómica y siguiendo la metodología descrita por Merodio y Rapela (1974).

ANALISIS ESTADISTICO

A semejanza de lo realizado con los elementos mayoritarios (Merodio y Rapela, 1979), el presente estudio se basa en la confección de histogramas de fre-



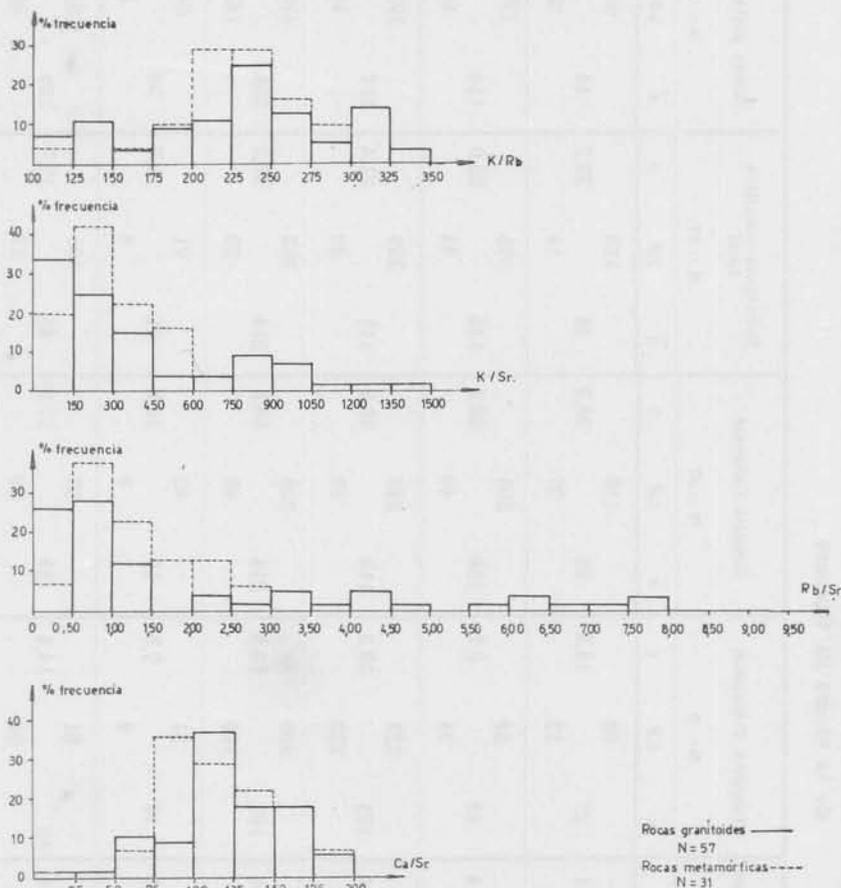


FIGURA 1

Histogramas de frecuencias de elementos traza y de ciertas relaciones de rocas granitoides y metamórficas de la sierra de Quilmes.

cuencias, en los cálculos de medias aritméticas y desviaciones típicas, en la estimación de modas y medianas, y en la resolución de las pruebas de significación basadas en la estimación de la asimetría y curtosis (Rodionov, 1965), en el desarrollo de diagramas de frecuencia acumuladas en escala lineal y logarítmica (Ahrens, 1963) y en la dócima de Pearson (Rodionov, op. cit.).

La Figura 1 presenta los histogramas de frecuencia relativa porcentual de los contenidos de los elementos litio, rubidio, estroncio, bario, cobre y cinc, y de las relaciones potasio/rubidio; potasio/estroncio; rubidio/estroncio y calcio/estroncio en las rocas granitoides y metamórficas analizadas. La Tabla 1 resume

TABLA 1

Promedios, desviaciones típicas y límites de fluctuación de elementos traza en rocas granitoides y metamórficas de la Sierra de Quilmes

(ppm)	Granito Cº Amarillo N = 12			Granodiorita Cuchiyaco N = 13			Tonalita Tolombón N = 9			Granito Cafayate N = 23			Secuencia granítica total N = 57			Rocas metamórficas N = 31		
	\bar{x}	LF	s	\bar{x}	LF	s	\bar{x}	LF	s	\bar{x}	LF	s	\bar{x}	LF	s	\bar{x}	LF	s
Li	34	54	12,0	43	61	11,1	27	58	14,2	60	118	26,9	46	118	23,3	44	91	14,5
Rb	288	193	62,2	75	88	11,4	43	50	6,2	126	295	49,3	135	375	95,0	114	173	34,8
Sr	55	83	18,4	115	145	15,4	163	223	39,2	118	329	76,5	111	329	61,4	107	192	37,3
Ba	216	300	51,3	227	352	79,8	191	300	65,4	214	350	66,8	214	352	66,2	298	496	89,6
Cu	29	71	15,5	23	30	5,0	16	31	7,5	19	43	10,6	22	71	11,2	34	84	17,8
Zn	47	105	25,5	48	64	10,4	49	81	14,8	39	86	17,2	45	105	17,8	105	164	26,9
		17		25	25		33	33		20	20		17	17		65	65	

\bar{x} = promedio; LF = límites de fluctuación; s = desviación típica; N = número de muestras.

TABLA 2

Valores de constantes estadísticas y pruebas de significación de los contenidos de elementos traza y de ciertas relaciones, correspondientes a rocas granitoides y metamórficas de la Sierra de Quilmes

	Mo		Md		$\frac{\gamma_1}{\sigma\gamma_1}$		$\frac{\gamma_1}{\sigma\gamma_1} \lg$		$\frac{\gamma_2}{\sigma\gamma_2}$		$\frac{\gamma_2}{\sigma\gamma_2} \lg$		X ²		X ² lg		D. F. A.		T. D.	
	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M
Li	27	37	41	40	3,87	2,53	2,61	0,34	2,22	1,61	0,52	0,63	7,17	3,46	5,83	4,66 ⁺	1gN	N. D.	1gN	N. D.
Rb	100	90	110	120	3,41	0,25	2,12	1,92	0,01	1,42	1,59	0,15	28,47	3,02	5,06	9,16	1gN	N.	1gN	N.
Sr	40 106	65	100	83	3,56	1,40	2,66	0,93	2,48	0,71	0,78	1,02	22,07	4,38	7,55	3,71	1gN	1gN	1gN	1gN
Ba	140 190 230	180 235	210	280	0,48	1,05	2,80	1,07	1,06	0,82	0,28	0,85	21,52	1,02	14,85	2,51 ⁺	P. M.	B. M.	P. M.	B. M.
Cu	21	28	20	29	4,48	2,94	2,54	1,60	6,61	1,54	0,64	0,01	8,69 ⁺	5,91	4,10 ⁺	2,70	1gN	1gN	1gN	1gN
Zn	42	80 125	44	100	2,94	0,89	2,09	0,61	2,00	1,15	0,50	1,46	12,45 ⁺	7,36	2,55	8,36	1gN	B. M.	1gN	B. M.
K/Rb	238	226	235	230	0,86	1,31	3,51	3,38	1,26	0,59	0,06	3,36	19,10	0,76	16,26	2,04	Asim.	N.	Asim.	N.
K/Sr	90	230	190	255	3,53	1,45	2,23	1,78	0,31	1,07	1,38	0,88	58,73	4,50	3,63	3,06 ⁺	1gN	1gN	1gN	1gN
Rb/Sr	0,60	0,88	1,20	1,00	4,62	1,67	2,28	2,16	2,06	0,70	1,57	0,16	109,26	6,57	7,66	0,99	1gN	1gN	1gN	1gN
Ca/Sr	120	90	120	105	0,21	2,07	3,43	0,05	1,20	0,73	0,42	0,57	2,01	5,03	6,73	0,62	N.	1gN	N.	1gN

Mo = moda aproximada; Md = mediana; $\frac{\gamma_1}{\sigma\gamma_1}$ y $\frac{\gamma_1}{\sigma\gamma_1} \lg$ — criterio de asimetría para valores normales y logarítmicos, respectivamente; $\frac{\gamma_2}{\sigma\gamma_2}$ y $\frac{\gamma_2}{\sigma\gamma_2} \lg$ — criterio de curtosis; X² y X² lg = criterio de Pearson (X² gran-
tos = 7,83; X² metamorfitas = 3,84; X² + — criterio de distribución.

Los valores promedios, las desviaciones típicas y los límites de fluctuación de los elementos estudiados en cada uno de los cuerpos granitoides así como en la secuencia granítica total y en las metamorfitas. La Tabla 2 muestra los resultados de moda aproximada, mediana y el resumen de pruebas de significación (con valores normales y logarítmicos) para el análisis de las formas de distribución de los contenidos y relaciones de esos mismos elementos en las rocas granitoides consideradas en conjunto y en las metamorfitas. En la prueba de chi-cuadrado se ha elegido el nivel de significación del 5 %; los intervalos se confeccionaron siguiendo el criterio sustentado por Agtenberg y Briggs (1963), en el que los mismos deben tener no menos de 5 frecuencias observadas; los grados de libertad y los valores límites de significación resultantes se encuentran consignados en la misma tabla. En la última columna se presenta el tipo de distribución (T. D.) en las rocas granitoides (G) y metamórficas (M) de acuerdo a los resultados logrados en las pruebas de significación. Un tipo no definido (N. D.) significa que la distribución empírica se adapta a la ley normal y a la lognormal.

Las Figuras 2 y 3 muestran algunos ejemplos de diagramas de frecuencia acumuladas en escala lineal y logarítmica, respectivamente, habiéndose seleccionado los más representativos por razones de economía.

DESCRIPCION DE LAS FORMAS DE DISTRIBUCION

Litio. En los granitos el histograma de frecuencias acumuladas muestra una asimetría positiva con la moda (27) menor que la media (46). Las pruebas de significación determinan claramente una distribución empírica que se adapta a la ley lognormal y rechaza la normal. El diagrama de frecuencias acumuladas (D. F. A.) en escala aritmética presenta un punto de inflexión con 30 p. p. m. de contenido del elemento y 31 % de frecuencia acumulada.

En las metamorfitas el histograma respectivo muestra un modelo aproximadamente simétrico. La moda (37) es menor pero cercana a la media (44). Las pruebas de significación aceptan las dos hipótesis planteadas por lo que el tipo de distribución no está definido. El D. F. A. en escala aritmética presenta un punto de inflexión en 50 p. p. m. de litio que se repite en el diagrama en escala logarítmica.

Rubidio. El histograma de los granitoides revela un modelo con asimetría positiva netamente definida. La moda (100) es menor que la media (135) y las pruebas de significación estadística indican una distribución de los valores de este elemento en los cuerpos granitoides que no contradice la ley lognormal. El D. F. A. en papel aritmético de probabilidad presenta un punto de inflexión con 73 % de frecuencia acumulada y 150 p. p. m. de contenido del elemento que se elimina en el diagrama construido en escala logarítmica (Figuras 2a y 3a).

Por el contrario, en las metamorfitas la distribución del rubidio sigue la ley normal, y el histograma respectivo muestra un modelo sensiblemente simétrico. En esta distribución la mediana (120) es mayor que la media (114) y ésta que la moda (90), aunque los valores no se diferencien significativamente, especialmente entre los dos últimos.

Estroncio. El histograma de frecuencias de los granitoides muestra una distribución bimodal (Modas: 40 y 106) con tendencia a una distribución con asi-

metría positiva. Las pruebas de significación definen una distribución que no contradice la ley lognormal y el D. F. A. presenta en escala aritmética (Figura 2b) un punto de inflexión en 75 p. p. m. del elemento y 31 % de frecuencia acumulada. La moda (65) es significativamente menor que la media (107).

Bario. Los histogramas de frecuencias relativas de los dos grupos de rocas muestran claramente modelos de distribución polimodales. Para los granitoides se han definido tres modas (140; 190 y 230) y para las metamorfitas dos (180 y 235). El D. F. A. y la prueba de Pearson en los cuerpos granitoides no aceptan ninguna de las dos hipótesis planteadas, en tanto que en las metamorfitas aceptan ambas.

Cobre. Para los dos tipos de roca (especialmente en las metamorfitas) los histogramas muestran una distribución con asimetría positiva en los que las modas presentan valores menores que las medias. Las pruebas de significación determinan una distribución que no contradice la ley lognormal para ambos grupos de rocas. Los dos D. F. A. presentan en escala aritmética sendos puntos de inflexión que se resuelven cuando los diagramas se construyen en papel de probabilidad logarítmico (Merodio y Rapela, 1975).

Cinc. El histograma de frecuencia de los granitoides presenta un modelo de distribución de los valores con tendencia a asimetría positiva. Las pruebas de significación determinan una distribución que sigue la ley lognormal presentando el D. F. A. un punto de inflexión en 60 p. p. m. de contenido de cinc y 87 % de frecuencia acumulada que se elimina en el gráfico logarítmico (Merodio y Rapela, 1975).

Por el contrario en las metamorfitas las pruebas de significación rechazan las dos hipótesis planteadas, siendo la distribución de los valores de este elemento del tipo bimodal. El histograma muestra claramente dos modas en 80 y 125 p. p. m. de cinc y el D. F. A. en escala aritmética presenta dos puntos de inflexión (Merodio y Rapela, 1975).

Potasio/Rubidio. En el conjunto de los granitoides el histograma de frecuencia muestra claramente un modelo de distribución de valores con asimetría negativa; la moda (238) es mayor que la media (229). Las pruebas de significación determinan que la distribución de los valores de esta relación no se adapta a ninguna de los dos tipos planteados, presentando el D. F. A. en escala aritmética un punto de inflexión con concavidad hacia abajo en 225 de relación y 40 % de frecuencia acumulada.

El histograma de frecuencia de las metamorfitas presenta una distribución aproximadamente simétrica con valores de moda y media coincidente. Las pruebas de significación determinan un modelo que no contradice la ley normal, rechazando la lognormal.

Potasio/Estroncio. Las distribuciones de la relación en los dos tipos de roca siguen la ley lognormal. Ambos histogramas muestran claramente una distribución con asimetría positiva, especialmente la de los granitos. La moda en estos últimos (90) es mucho menor que la media (384). En las metamorfitas sus valores son 230 y 282, respectivamente. Los D. F. A. de ambos grupos de valores presentan sendos puntos de inflexión: el de los cuerpos granitoides en 450 de rela-

Fig-2a

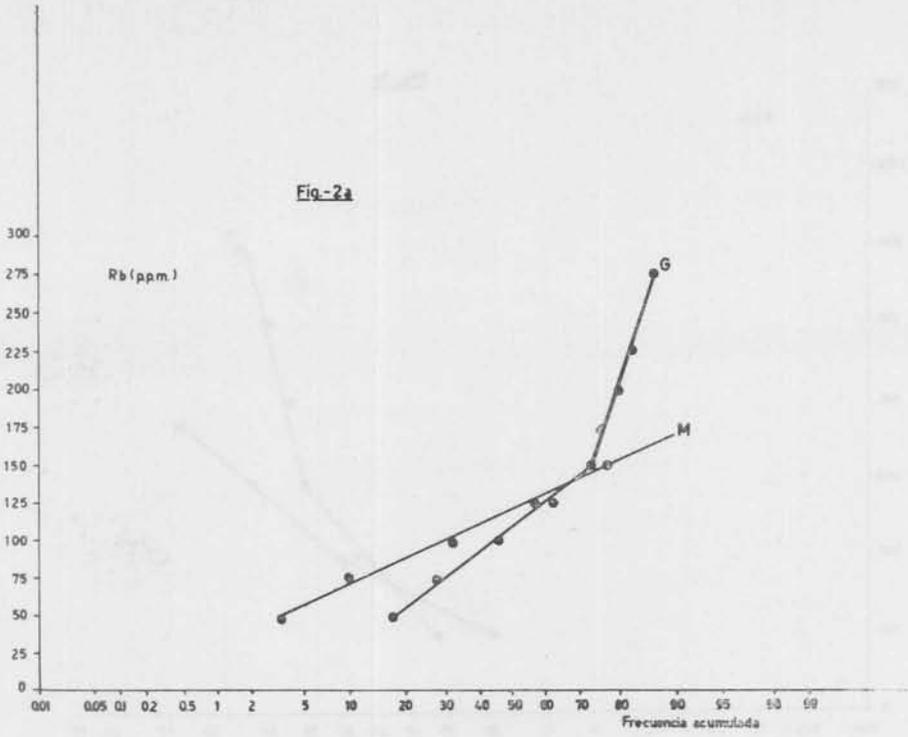
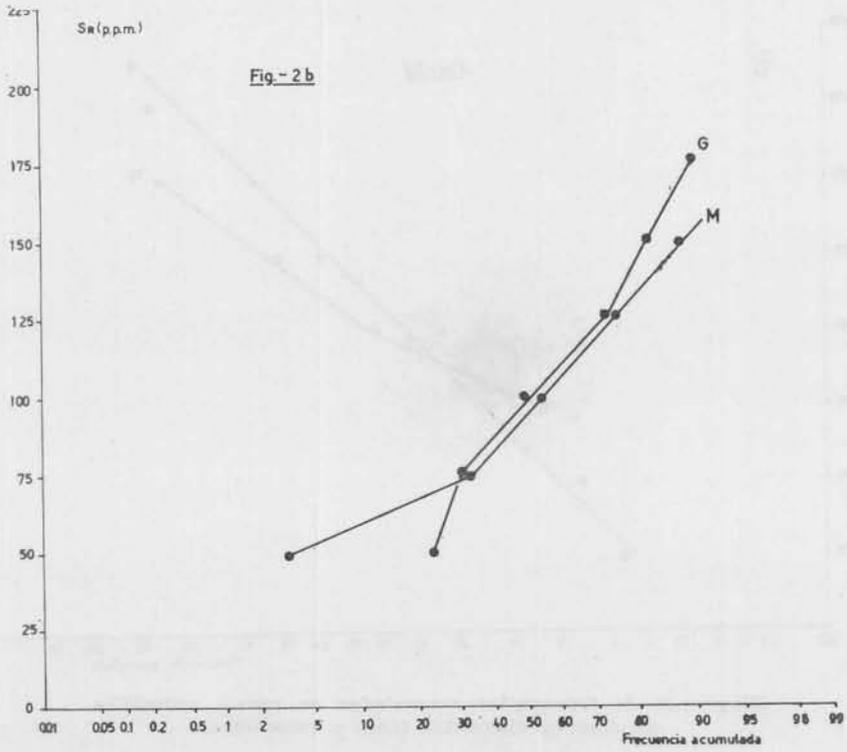
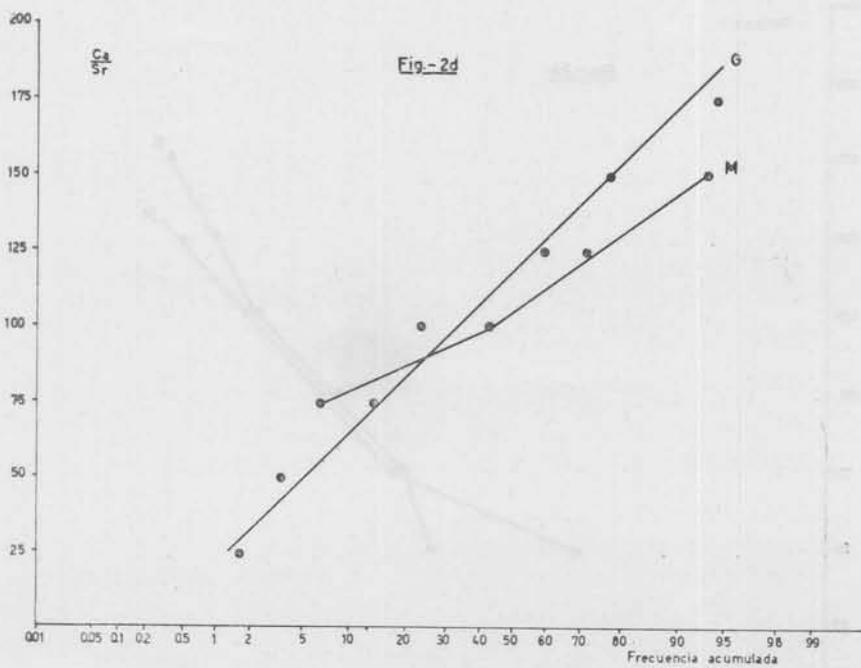
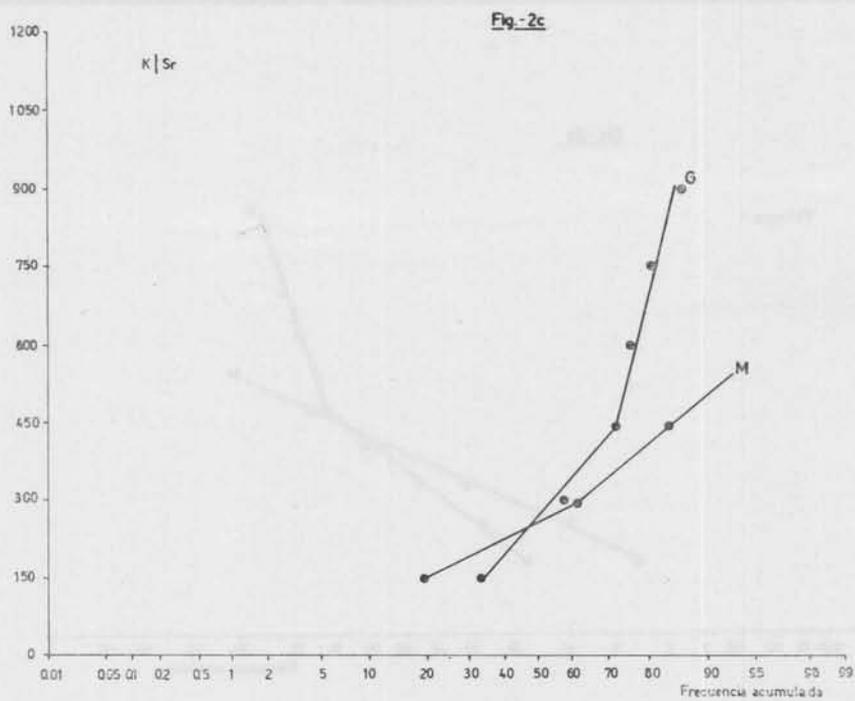


Fig-2 b





Diagramas de frecuencias acumuladas en escala aritmética de algunos elementos traza y relaciones.

ción y 72 % de frecuencia acumulada; el de las metaforfitas en 300 de relación y 62 % de frecuencia acumulada (Figura 2c).

Rubidio/Estroncio. El resultado obtenido es semejante al de la relación anterior. Los histogramas respectivos definen modelos con neta asimetría positiva, siendo la misma más pronunciada en los granitos. La moda de estos últimos (0,60) difiere de la media (2,13) en mayor proporción que los respectivos valores de las metamorfitas (0,88 y 1,26). Por otra parte la prueba de Pearson indica claramente esta diferencia. Los D. F. A. en escala aritmética acusan sendos puntos de inflexión coincidentes para ambos tipos de roca, en 1,40 de relación y 67 % de frecuencia acumulada.

Calcio/Estroncio. El histograma de esta relación en los granitoides revela un modelo aproximadamente simétrico, con valores de moda (120) y de media (121) muy próximos. Las pruebas de significación establecen una distribución que se ajusta a la ley normal, en donde la moda, media y mediana prácticamente coinciden.

Esta relación en las metamorfitas, en cambio, sigue la ley lognormal. El histograma muestra una distribución con asimetría positiva, en donde la moda (90) es sensiblemente menor que la media (112). El D. F. A. en escala aritmética acusa un punto de inflexión en 100 de valor de relación y 42 % de frecuencia acumulada (Figura 2d).

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

El modelo de distribución global de los valores de una variable perteneciente a una población compleja constituida por varias subpoblaciones, es la resultante de las distribuciones de cada componente del conjunto. Para el caso de la secuencia granítica total, las unidades litológicas que la componen definen individualmente un modelo de distribución que en general se ajusta a una ley determinada. La resultante del conjunto considerado como una unidad, surge de la yuxtaposición o solapamiento de las curvas de cada subpoblación. Todos los elementos analizados presentan en el complejo granitoide y con excepción del bario, una distribución que sigue la ley lognormal. Este resultado puede significar que las fases con contenidos más elevados del elemento presentan también la mayor dispersión de esos valores.

Por ejemplo, considerando el caso de dos subpoblaciones que se distribuyen individualmente según la ley normal, cuando el solapamiento de las mismas es significativo (valores modales relativamente cercanos) la distribución resultante seguirá en líneas generales también la ley normal, posiblemente con cierta asimetría positiva o negativa. Son los casos que Ahrens (1963) denomina distribución doble normal. Pero cuando la superposición no es tan manifiesta y la subpoblación con contenido medio más elevado tiene el mayor valor de dispersión de los datos, la distribución resultante puede adaptarse a la ley lognormal. Significa esto que existe un número relativamente pequeño de especímenes de esta subpoblación que presentan contenidos anormalmente elevados, y que no son "enmascarados" por los valores de la otra subpoblación. Resumiendo, el modelo resultante de dos subpoblaciones con distribución normal y diferente grado de

dispersión, siendo esta última más grande en la subpoblación de moda mayor. se adaptará a la ley normal, o a la lognormal o presentará incluso dos modas, según el grado de solapamiento de las curvas componentes.

A la luz de estas observaciones se analizan seguidamente los comportamientos estadísticos de los elementos y relaciones estudiadas en los dos tipos de roca.

Litio. La distribución lognormal de este elemento en el grupo granitoide está definida por la del Granito Cafayate, que presenta el mayor contenido promedio de litio (60 p. p. m.), y la mayor dispersión de valores, de 27 hasta 118 p. p. m. con una desviación típica (S) de 26,9 (Tabla 1). Esta circunstancia determina que el modelo de distribución de esta fase granitoide presente una cola con asimetría positiva que caracteriza la forma general del grupo como conjunto. Esta manifiesta heterogeneidad de los contenidos del elemento surge como consecuencia de la gran variedad composicional que caracteriza al Granito Cafayate, en el que se pueden definir tres facies: tonalítica, granodiorítica y granítica (Rapela y Shaw, op. cit.). De este modo el contenido promedio de magnesio —al cual el litio sustituye diadóticamente en la secuencia de cristalización— varía entre límites muy amplios derivando en una dispersión también grande de los valores del elemento traza.

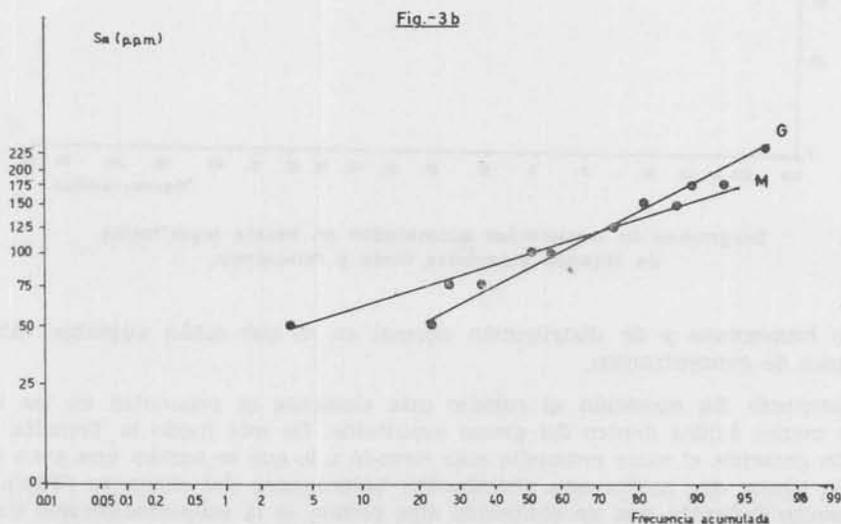
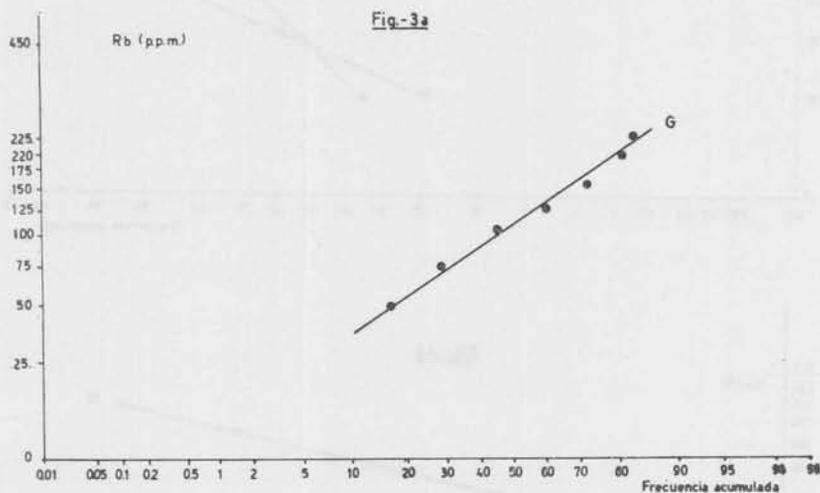
En las metamorfitas la distribución empírica resultante acepta las dos hipótesis planteadas con una tendencia general a la normalidad. Los valores superiores a 50 p. p. m. de contenido de litio presentan una distribución anómala que complica al diagrama de frecuencias acumuladas y que determina que la distribución no puede ser definida.

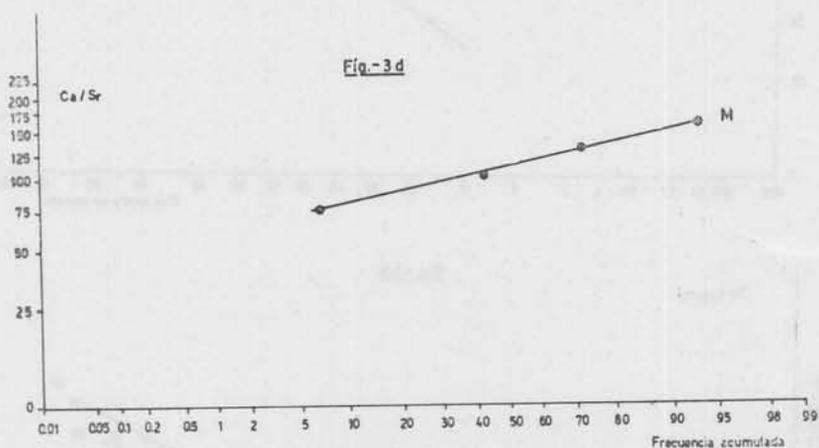
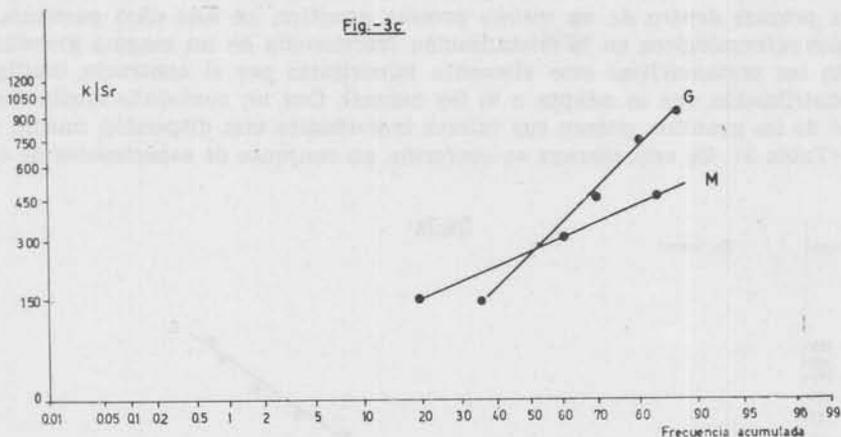
Rubidio. El Granito Cerro Amarillo con contenido medio mayor de este elemento en el grupo granitoide (288 p. p. m.) y la mayor dispersión de valores (de 193 a 375; S = 62,2) configura una distribución con asimetría positiva respecto de la del conjunto, conduciendo a su vez, a una distribución general del rubidio en las rocas granitoides que se adapta a la ley lognormal. Es importante señalar que la Tonalita Tolombón con el menor contenido de rubidio, acusa también la dispersión de valores más baja (Tabla 1). Los resultados que presentan estas dos unidades litológicas (Granito Cerro Amarillo y Tonalita Tolombón) reflejan la influencia que ejerce el potasio en la distribución del rubidio. En efecto, este elemento tiene similar tamaño, carga y electronegatividad que el potasio motivo por el cual observa una muy estrecha relación con este mayoritario. Rapela (1976b) encuentra dentro del grupo granitoide que el Granito Cerro Amarillo acusa el mayor contenido de potasio y la Tonalita Tolombón el menor valor promedio, determinando así las condiciones necesarias para definir a su vez los contenidos de rubidio.

Por otra parte, llama poderosamente la atención que diagramas logarítmicos Rb-Sr de las rocas graníticas, muestran asimismo un punto de inflexión aproximadamente 150 p. p. m. de ambos elementos en la tendencia evolutiva del cuerpo granítico mayor (Granito Cafayate, Rapela y Shaw, op. cit.). El modelo matemático indica claramente que el punto de inflexión se debe a la aparición del feldespato de potasio (junto a plagioclasa, cuarzo, biotita y muscovita que ya venían cristalizando) al llegar a la línea cotéctica del sistema Q — Ab — An — Or — H₂O. La aparición de dos subpoblaciones en el diagrama de frecuencias

acumuladas en escala aritmética podría atribuirse entonces también, a *variaciones propias dentro de un mismo proceso genético*, en este caso particular, a cambios mineralógicos en la cristalización fraccionada de un magma granítico.

En las metamorfitas este elemento minoritario por el contrario, configura una distribución que se adapta a la ley normal. Con un contenido medio menor que el de los granitos, poseen sus valores individuales una dispersión mucho más baja (Tabla 2). De esta manera se conforma un conjunto de especímenes de con-





Diagramas de frecuencias acumuladas en escala logarítmica de algunos elementos traza y relaciones.

tenido homogéneo y de distribución normal en el que están ausentes valores extremos de concentración.

Estroncio. En oposición al rubidio este elemento se concentra en las unidades menos ácidas dentro del grupo granitoide. De este modo la Tonalita Tolombón presenta el valor promedio más elevado a lo que se agrega una gran desviación típica, que indica una distribución heterogénea del elemento (Tabla 1). El Granito Cafayate, con un contenido algo menor, es la subpoblación que muestra la mayor dispersión de valores ($S = 76,5$; Tabla 1). Todas estas circunstan-

cias determinan que la distribución global del estroncio en el grupo granitoide acepte la ley lognormal. Las dos unidades litológicas nombradas arriba presentan en su heterogeneidad, valores anormalmente altos (Tabla 1) que se alejan sensiblemente de la media aritmética, definiendo modelos de distribución con asimetría positiva. La forma de esta distribución se completa con el hecho de que el Granito Cerro Amarillo de menor contenido medio de estroncio, presenta una desviación típica relativamente pequeña.

Dada su doble diadocia (potasio y calcio) el comportamiento geoquímico del estroncio es más complejo que el del rubidio. El coeficiente de partición

sólido-líquido total ($D_{Sr} = \frac{C^s}{C^o}$) es mayor de 1, lo cual determina que la con-

centración del estroncio disminuirá en los líquidos residuales, observando por lo tanto un comportamiento inverso al del rubidio. Los modelos matemáticos predicen un punto de inflexión en la cristalización fraccionada por las mismas razones mencionadas anteriormente para el rubidio (Cf. Rapela y Shaw, op. cit., Figuras 6a y 6c). Es importante recordar aquí, que dentro de las rocas graníticas, el Granito Cerro Amarillo tiene características petrográficas, geoquímicas y de edad (carbónica) que lo diferencian del resto de la secuencia de confirmada edad ordovicica (Rapela, 1976a). La condición de bimodalidad de la distribución del estroncio en las rocas graníticas podría atribuirse en este caso a composiciones diferentes de los magmas primarios, instruidos en una misma área en diferentes edades.

En las metamorfitas el estroncio se distribuye igualmente siguiendo la ley lognormal. El histograma de frecuencias (Figura 1) muestra contenidos de este elemento con valores entre 150 y 192 p. p. m., alejados manifiestamente de la media aritmética (117), y que configuran una cola con asimetría positiva en el modelo de distribución. Entre el valor de la moda (65) y el valor individual más bajo (48) sólo existen 17 unidades, en tanto que entre aquel valor y el más elevado (192) la diferencia es de 127 unidades.

Bario. En ambos tipos de roca el bario muestra una dispersión muy grande de sus contenidos (Tabla 1). Las cuatro unidades litológicas granitoides presentan tenores y límites de fluctuación semejantes entre sí y que configuran una distribución resultante polimodal que no acepta ninguna de las dos hipótesis planteadas.

La alta dispersión de los valores del bario, aún dentro de una misma unidad, da lugar a diagramas de variación "nubes" que no determinan ninguna tendencia evolutiva. Por ejemplo, el diagrama K vs. bario muestra esta característica. Parte de este comportamiento puede deberse a problemas analíticos —la precisión en las determinaciones de bario por absorción atómica es pobre comparada a la de los demás elementos analizados— pero una mayor proporción debe atribuirse a características del propio proceso magmático. McCarthy y Robb (op. cit.) encuentran similares problemas en granitos sudafricanos, que los atribuyen a concentraciones acumulativas de biotita durante la cristalización fraccionada.

Cobre. Cobre y cinc pertenecen al grupo de elementos traza denominados colectivamente "elementos formadores de menas". Tauson (1965, pp. 240-241) refiriéndose a este grupo de elementos ha dicho al respecto: "las propiedades químicas y cristaloquímicas de este grupo difieren sustancialmente de la de los elementos diadócicos. La mayoría de ellos tiene una unión con el oxígeno mucho más covalente que la de los típicos elementos litófilos. Esta circunstancia conduce a una limitación en la diadocia de los minerales esenciales y accesorios de las rocas, y por lo tanto induce la formación de ocurrencias no-diadócicas". El cobre no está asociado cristaloquímicamente con ninguno de los elementos petrogénicos por lo que cabe esperar un comportamiento errático, dada su preferencia por formar sulfuros más que a reemplazar silicatos. Dentro del grupo granitoide el Granito Cerro Amarillo, a semejanza de lo que ocurre con los contenidos de rubidio, presenta el valor medio de cobre y la desviación típica más elevados, determinando un modelo de distribución con asimetría positiva. Con este elemento se da la circunstancia de que nuevamente la fase granitoide con menor contenido (Tonalita Tolombón) presente también la dispersión más baja. Toda esta situación conduce a definir una distribución para la secuencia granítica total que acepta la ley lognormal.

En las metamorfitas el cobre también sigue la ley lognormal de distribución. Su valor de dispersión es relativamente elevado ($S = 17,8$, Tabla 1) y presenta un tamaño del intervalo comprendido entre el valor de la moda y el tenor más elevado (50 unidades) que duplica al del intervalo entre aquél y el contenido menor.

Cinc. Este elemento se caracteriza por presentarse en las rocas como dispersiones atómicas o moleculares, que se forman como consecuencia de la descomposición de soluciones sólidas. En efecto, el Zn^{++} ($r = 0,74 A$) es similar en tamaño al Fe^{++} ($r = 0,75 A$), pudiendo reemplazar también el Mg^{++} ($r = 0,66 A$); de acuerdo a ello, el cinc se encuentra preferencialmente en los minerales ferromagnésicos. En las rocas granitoides se lo encuentra en la biotita más que en cualquier otro mineral (Taylor, op. cit.).

Las experiencias de Tauson (op. cit.) han demostrado que las soluciones sólidas que forma el cinc en las biotitas se descomponen a medida que desciende la temperatura y cambian las condiciones de estabilidad termodinámica. De este modo se produce una dispersión de sus átomos por la red cristalina del mineral sin formar enlaces con los silicatos.

La Tabla 1 indica que no hay diferencias absolutas significativas en los contenidos promedio de cinc en las distintas fases granitoides de la Sierra de Quilmes. En cambio las rocas metamórficas tienen un contenido promedio superior al doble de la secuencia granítica.

La distribución del cinc en el conjunto granitoide sigue la ley lognormal. El Granito Cerro Amarillo presenta una dispersión relativamente elevada con contenidos máximos de cinc (105 p. p. m.) que se alejan sensiblemente de la moda (42 p. p. m.). Notable es la heterogeneidad de este cuerpo: presenta los valores más elevados y más bajos de cinc, pero estos últimos no se diferencian significativamente del valor modal, de manera que su distribución presenta asimetría positiva.

La distribución del elemento en las metamorfitas indica la presencia de dos subpoblaciones. Quizá con un mayor número de datos pudiera resolverse el tipo de distribución global, configurando un modelo que acepte una u otra de las hipótesis planteadas.

Análisis de las relaciones. Son muchos los factores que intervienen en la conformación del modelo de distribución de una población compuesta por relación de variables. Debe tenerse presente que la misma es la consecuencia de la división de par de valores pertenecientes a dos universos diferentes. Fundamentalmente, entonces, el tipo resultante podrá depender del modelo estadístico que siga cada uno de los términos de la relación y de sus características geoquímicas, tales como grado de compatibilidad y coherencia, propiedades diádicas generales y sus relaciones correspondientes, etc.

Aunque el número de ejemplos estudiados aquí es reducido, puede intentarse siquiera un análisis global de los resultados obtenidos y que se presentan en las cuatro últimas filas de la Tabla 2. El mismo permite delinear las siguientes conclusiones tentativas:

1. Los datos que resultan de dividir dos grupos de valores que siguen la misma ley de distribución, se adaptarán a esta misma distribución. Esto se ve claro en las relaciones K/Rb , K/Sr y Ca/Sr en las metamorfitas y Rb/Sr en los granitos. Para la formas de distribución de los elementos mayoritarios se debe consultar el trabajo de Merodio y Rapela (1979).

2. Cuando la distribución de una de las variables es polimodal la resultante de la relación puede adaptarse a la ley normal (Ca/Sr en granitoides), o a la ley lognormal (K/Sr en granitoides) o presentar inclusive asimetría negativa (K/Rb en granitoides).

Este último ejemplo, opuesto al anterior, indica que la mayor proporción de muestras presentan en el grupo granitoide relación alta de K/Rb . Valores bajos de esta relación son característicos de condiciones de extremo fraccionamiento en que el rubidio se concentra en los líquidos residuales en una secuencia de cristalización fraccionada.

3. Las relaciones K/Rb y Rb/Sr presentan puntos de inflexión en los diagramas de frecuencia acumuladas en escala aritmética, que se adecúan notablemente a los predichos por un modelo matemático de cristalización fraccionada de un magma granodiorítico (K/Rb 225 y 200; Rb/Sr 1,40 y 1,20, respectivamente). Las subpoblaciones resultantes podrían explicarse así satisfactoriamente desde el punto de vista petrológico y geoquímico.

BIBLIOGRAFIA

- AGTENBERG, F. P. y BRIGGS, G., 1963. — Statistical analysis of Ripple-Marks in Atokan and Desmonesian rocks in the Arkoma basin of East-Central Oklahoma. *Jour. Sediment. Petrol.* 33 (2): 393-410.
- AHRENS, L. H., 1963. — Element distributions in igneous rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta* 27: 877-890.

- AHRENS, L. H., 1966. — Element distributions in specific igneous rocks. VIII. Geochim. Cosmochim. Acta, 30: 109-122.
- MCCARTHY, T. S. y HASTY, R. A., 1976. — Trace element distribution pattern and their relationship to the crystallization of granitic melts. Geochim. Cosmochim. Acta, 40: 1351-1358.
- MCCARTHY, T. S. y ROBB, L. S., 1978. — On the relationship between cumulus mineralogy and trace alkali element chemistry in an Archean granite from the Barberton Region, South Africa. Geochim. Cosmochim. Acta 42: 21-26.
- MERODIO, J. C. y RAPELA, C. W., 1974. — Determinación de elementos minoritarios y traza en rocas ígneas por espectrometría de absorción atómica. I: Litio, rubidio, estroncio, bario, cobre y cinc. Revista de la Asoc. Arg. de Mineralogía, Petrol. y Sedimentol. 5 (1-2); 1-14.
- 1975. — Distribución de cobre y cinc en movillados granitoides y rocas metamórficas de la región de Cafayate (Salta). II Congreso Iberoamericano de
- 1979. — Distribución estadística de elementos mayoritarios en rocas granitoides y metamórficas asociadas. Obra Centenario del Museo de La Plata, IV: 225-242.
- RAPELA, C. W., 1976a. — El basamento metamórfico de la región de Cafayate, provincia de Salta. Aspectos petrológicos y geoquímicos. Revistas de la Asoc. Geológica Argentina, 31: 203-222.
- 1976b. — Las rocas granitoides de la región de Cafayate, provincia de Salta. Aspectos petrológicos y geoquímicos. Revista de la Asoc. Geológ. Argentina, 31(4): 260-278.
- RAPELA, C. W. y SHAW, D. M., 1979. — Trace and major element models of granitoid genesis in the Pampean Ranges, Argentina. Geochim. Cosmochim. Acta, 43: 1117-1129.
- RODIONOV, D. A., 1965. — Distribution functions of the element and mineral contents of igneous rocks. Consultants Bureau. Nueva York.
- ROCKE, J. M., 1964. — Element distribution in some acid igneous rocks of Africa. Geochim. Cosmochim. Acta, 28: 1187-1197.
- TAUSON, L. V., 1965. — Factors in the distribution of the trace elements during the crystallisation of magmas. En "Physics and Chemistry of the Earth", 6: 215-249.
- TAYLOR, S. R., 1965. — The application of trace element data to problems in petrology. En "Physics and Chemistry of the Earth", 6: 133-213.
- TOSELLI, A. J. ROSSI DE TOSELLI, J. N. y RAPELA, C. W., 1978. — El basamento metamórfico de la Sierra de Quilmes. Revista de la Asoc. Geológ. Argentina, 33: 105-121.