

GEOQUIMICA DE LAS ROCAS VOLCANICAS DE LA FORMACION ALISITOS DEL ARROYO LA BOCANA EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA NORTE

*Emilio Almaxan-Vaxquez**

RESUMEN

La serie volcano-sedimentaria del Cretácico Temprano de la Formación Alisitos, en el Arroyo La Bocana, está constituida por 2,000 m de calizas de biohermas, lutitas, grauwacas, derrames de lava y rocas piroclásticas interstratificadas. El presente artículo está enfocado al estudio geoquímico de los elementos mayores, los clinopiroxenos y los elementos traza contenidos en el material volcanogénico de la Formación Alisitos.

Las concentraciones de elementos mayores muestran que las lavas analizadas son primordialmente dacitas, riolitas y riolitas con la presencia subordinada de basaltos y andesitas. El titanio, magnesio y hierro total confrontados con el índice de diferenciación señalan que el material estudiado es característico de series calci-alcálicas de arcos insulares lo cual es reforzado por la posición de las rocas analizadas en los diagramas álcalis/sílice y A.F. M. de Kuno (1959 y 1968).

El clinopiroxeno particular del material volcánico es una augita magnésiana, la cual es característica de series calci-alcálicas de acuerdo con los diagramas elaborados por Le Bas (1962) y Leterrier y colaboradores (1982).

Los contenidos de elementos traza de las rocas analizadas y la relación entre las elementos higromagmatofílicos confirman la naturaleza calci-alcálica de arco insular en las rocas volcánicas de la Formación Alisitos, en el Arroyo La Bocana.

La geoquímica de las rocas volcánicas y la particular asociación litológica que constituyen la Formación Alisitos permiten deducir que durante el Aptiano-Albiano un arco insular de naturaleza calci-alcálica estuvo emplazado cerca de la margen occidental de la Placa de América del Norte, produciendo condiciones de depósito, tanto marinas de aguas someras y tropicales, como de ambientes subaéreos donde predominó una intensa actividad volcánica explosiva.

ABSTRACT

The Lower Cretaceous volcano-sedimentary suite of the Alisitos Formation in Arroyo La Bocana is formed by 2,000 m of interstratified biohermal limestones, shales, graywackes, lava flows and pyroclastic rocks. This paper is referred to geochemistry of the major elements, clinopyroxenes and trace elements in the volcanogenic material of the Alisitos Formation.

The concentrations of major elements show that the analyzed lava flows are predominantly dacites, rhyodacites and rhyolites with minor amounts of basalts and andesites. Titanium, magnesium and total iron confronted with the differentiation index show that the studied material is characteristic of calc-alkaline suites and is corroborated by the position of the rock samples in the alkalis/silica and A.F.M. diagrams of Kuno (1959 and 1968).

The peculiar clinopyroxene of the volcanic rocks is a magnesian augite and this mineral is characteristic of calc-alkaline suites according to diagrams of Le Bas (1962) and Leterrier and coworkers (1982).

The contents of trace elements in the analyzed rocks and the relationship of hygromagmatophilic elements confirm the calc-alkaline nature of the insular arc volcanic rocks of the Alisitos Formation in Arroyo La Bocana.

The geochemistry of the volcanic rocks and the particular lithologic association of the Alisitos Formation are the consequence of an insular arc calc-alkaline activity close to the western margin of the North American plate during Aptian-Albian, resulting in deposit both of marine shallow and tropical waters as well as subaerial environments where an intensive explosive volcanic activity prevailed.

GENERALIDADES

La Formación Alisitos es una unidad volcano-sedimentaria del Cretácico Temprano que aflora discontinuamente desde Ensenada hasta El Arco, en la parte occidental del Estado de Baja California Norte, ocupando una angosta franja de 50 km de anchura por 500 km de longitud.

Entre los antecedentes más sobresalientes, se encuentran los trabajos de Santillán y Barrera (1930), quienes propusieron formalmente el nombre de Formación Alisitos para una secuencia de 200 m de espesor, formada por lutitas y areniscas metamorfoseadas ligeramente y que contiene invertebra-

dos fósiles del Cretácico Temprano, expuesta cerca del Rancho Alisitos en el Valle de Santo Tomas, en el Estado de Baja California Norte.

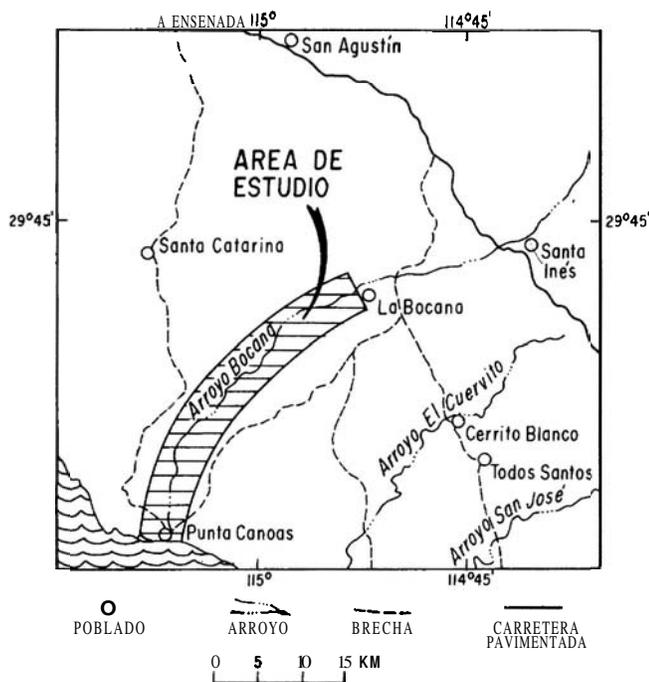
La misma secuencia, en otras regiones del Estado, ha recibido nombres diferentes como Formación "Pre-Chico" (Darton, 1921), Formación San Fernando (Beal, inedito, 1924) y Formación San Telmo (Woodford y Harris, 1938).

Entre los estudios previos sobresalen los elaborados por Allison (1955 y 1974), en los que describió la estratigrafía de la Formación Alisitos en Punta China, destacando su contenido paleontológico. En sus aspectos bioestratigráficos esta misma formación ha sido estudiada en las regiones de Punta San Isidro (Kirk y MacIntyre, 1951), entre Ensenada y Colonia Guerrero (Silver *et al.*, 1963), al oriente de El Rosario (Reed, 1967) y en los alrededores de El Arco y Calmalli (Rangin, 1978).

* Estacion Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Apartado Postal 1039.83000 Hermosillo. Sonora,

INTRODUCCION

El presente artículo se refiere a la columna **estratigráfica** de la Formación Alisitos que esta expuesta a lo largo del Arroyo La Bocana. Dicha area queda geograficamente **enmarcada** por los **paralelos 29°30' y 29°45' N y 114°50' y 115°15' W** (Figura 1).



DIBUJO: E. G. N.

Figura 1.- Mapa de localización del Arroyo La Bocana, donde afloran 2,000 m de la Formación Alisitos.

La secuencia litológica, de un espesor de 2,000 m, esta constituida en mas de la mitad por rocas piroclasticas, una tercera parte por derrames de lavas y unicamente un 13% por rocas epiclasticas y calizas biogenas.

La columna estratigrafica ha sido dividida en siete miembros (Figura 2) que, de la base a la cima, tiene las siguientes características **litológicas**:

Miembro A. Su base no esta expuesta y en su espesor de 590 m predominan las tobas hialinas y las tobas vitrolíticas de estructura ignimbrítica con niveles subordinados de riolitas, **dacitas**, traquiandesitas, limolitas y packstones con fragmentos de lamelibranquios.

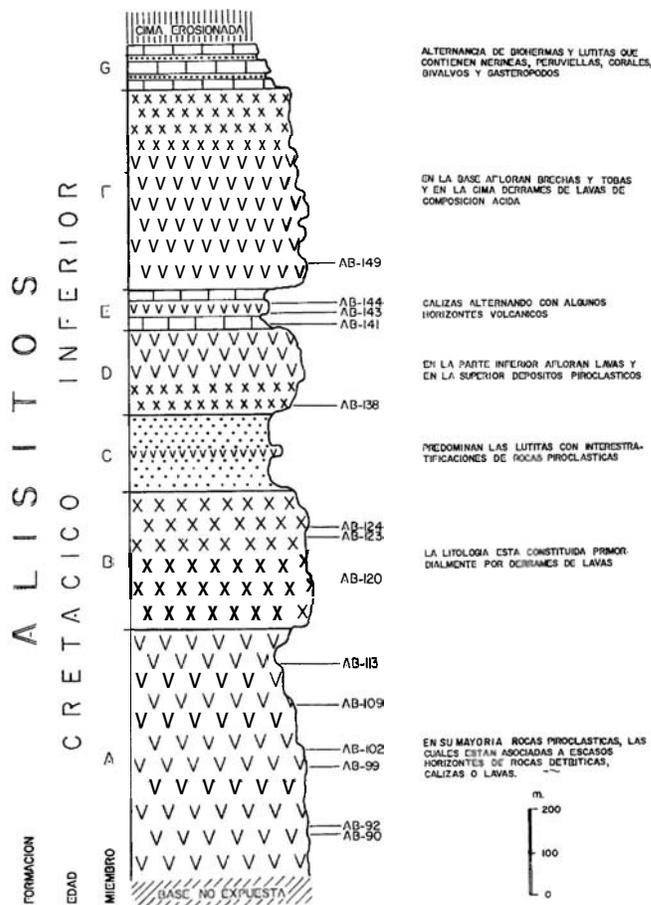


Figura 2.- Posición de los niveles analizados de la columna estratigráfica de la Formación Alisitos para el estudio geoquímico de las rocas volcánicas.

Miembro B. Esta constituido principalmente por **dacitas, riolitas** y riolitas con escasos horizontes **interestratificados** de tobas ignimbríticas, limolitas y calizas biogenas.

Miembro C. Es un miembro volcano-sedimentario de 179 m de espesor en donde alternan tobas hialinas, tobas vitrocristalinas, cineritas, grauvacas y limolitas.

Miembro D. En la base afloran 67 m de lavas dacíticas eucristalinas y superpuestos hay 123 m de tobas vitrocristalinas de estructura ignimbrítica.

Miembro E. Esta formado por 53 m de lavas riolíticas de estructura ignimbrítica, 33 m de calizas con fragmentos de lamelibranquios, 6 m de tobas ignimbríticas vitrocristalinas y 5 m de grauvacas.

Miembro F. En la parte inferior afloran predominantemente 331 m de tobas cristalinas, vitrocristalinas, vitrolíticas y lapilitas y en la cima 143 m de lavas **riolíticas**, profundamente alteradas.

Miembro G. Es el unico miembro sedimentario en donde alternan horizontes de grauvacas y packstones con fragmentos de lamelibranquios, políperos y equinodermos.

7.83%) con un claro predominio del sodio (3.21 a 7.05%) sobre el potasio (0.07 a 2.88 %). Las variaciones de calcio (0.44 a 6.73%) y de magnesio (0.54 a 5%) son sensibles. El hierro total [$FeO^* = FeO + (0.9)Fe_2O_3$] es elevado (3.06 a 12.83%), siendo mayores las concentraciones de oxido ferrico en relacion con las correspondientes de FeO .

La posicion de las muestras en el diagrama de Williams y colaboradores (1955) indica con claridad que las rocas analizadas en su mayoría son acidas, situandose predominantemente en los campos de las dacitas, riolitas y fonolitas (Figura 3).

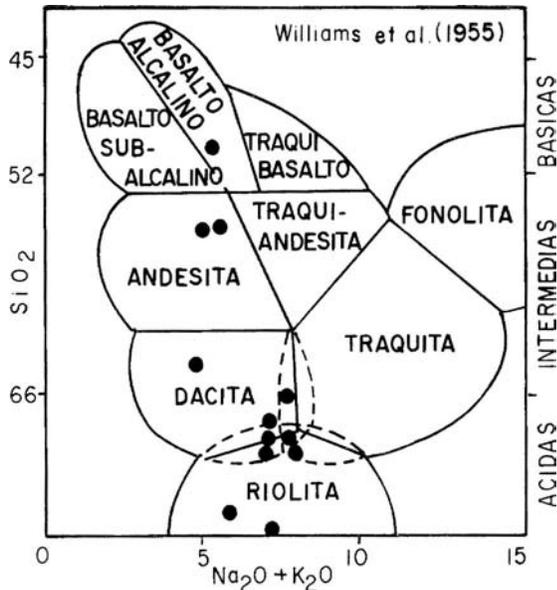


Figura 3.-Predominio de rocas volcánicas ácidas en la Formación Alisitos del Arroyo La Bocana.

Por otra parte, la clasificación establecida por Pecerrillo y Taylor (1976) resalta los pobres valores del potasio, inferior a 1.2%, que en la mayoría de las riolitas rebasa el 68% de silice (Figura 4); esto comprueba el fenómeno de movilidad y fácil migración del potasio durante la diagenesis. Además, en este diagrama queda constatada la gran dispersión de

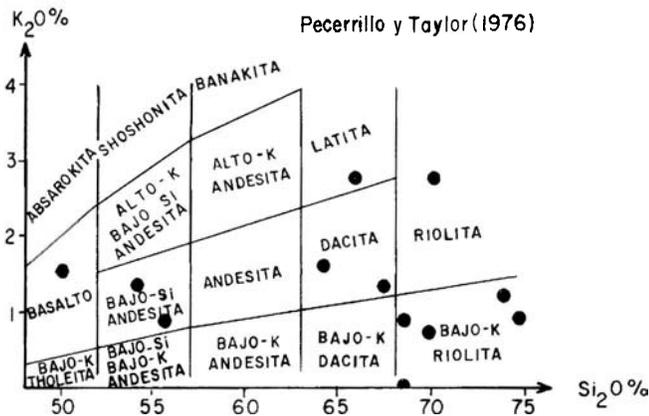


Figura 4.- Diagrama donde se observa una gran dispersión de las muestras volcánicas analizadas de la Formación Alisitos y la ausencia de correlación entre el potasio y la silice.

las muestras y la ausencia de correlación entre el potasio y la silice.

En las figuras antes citadas, se observa una clara separación de dos zonas de composición magmática diferente. El grupo mayoritario de muestras analizadas constituye el conjunto de rocas magmáticamente más evolucionadas, formado por dacitas, riolitas y fonolitas, caracterizadas por una variación de silice de 64 a 74.5% y un contenido en alcalis superior al 7%. Por el contrario, el grupo geoquímicamente menos evolucionado está formado únicamente por tres muestras, representado por basaltos y andesitas, con un porcentaje inferior al 56% en silice y un contenido que no rebasa el 5.5% en alcalis. De lo anterior se desprende la ausencia, en el área estudiada, de rocas volcánicas transicionales que permitan la continuidad entre los polos básico y ácido.

En el diagrama triangular de la Figura 5, se observa una fuerte tendencia de las muestras analizadas hacia el polo de sodio aunada a valores menores de calcio y mínimos de potasio; lo cual puede indicar aportes adicionales de sodio a las rocas, mediante procesos hidrotermales y una lixiviación del potasio durante los procesos diagenéticos.

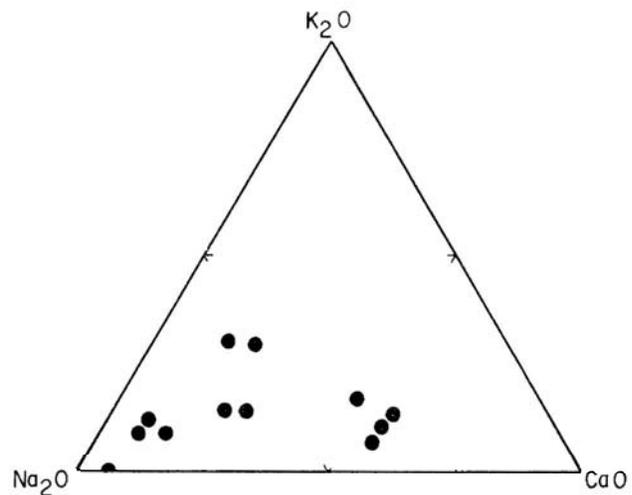


Figura 5.- Diagrama triangular donde resalta una clara tendencia hacia el polo de sodio y una pobre concentración en potasio de las rocas volcánicas analizadas de la Formación Alisitos.

Además, la saturación de silice en la mayoría de las rocas analizadas, ya que el cuarzo normativo varía de 22.53 a 36.60% en las dacitas y riolitas mostrando en cierta medida valores extremos, también puede interpretarse como un aporte adicional de este elemento, muy probablemente a través de soluciones hidrotermales.

En las normas C.I.P.W. (Cross et al., 1903) cinco muestras analizadas de riolita contienen corindón normativo, lo cual es un claro indicio de la pérdida de una parte de los alcalis durante la alteración litológica.

Lamentablemente, las pobres condiciones de conservación de las rocas que constituyen la Formación Alisitos en el Arroyo La Bocana impiden elaborar análisis geoquímicos en rocas sanas desprovistas de cualquier alteración.

Los diagramas del índice de diferenciación (D.I.) han sido definidos por Thornton y Tuttle (1960) como el resulta-

do de la suma de los porcentajes normativos de cuarzo, ortoclasa, albita, nefelina, leucita y kalsilita, confrontados habitualmente con las variaciones de los porcentajes en óxidos de las rocas analizadas. En los diagramas de la Figura 6 se observa que el SiO_2 aumenta rápida y regularmente en el transcurso de la diferenciación (Figura 6-a), lo que contrasta con la fuerte dispersión del aluminio (Figura 6-b). Una ligera dispersión e incremento en sodio es evidente en la Figura 6-c.

Por otra parte, los diagramas nos permiten constatar una disminución de titanio regular (Figura 6-d), calcio (Figura 6-e), magnesio (Figura 6-f) y hierro total (Figura 6-h) en el curso de la diferenciación magmática, patentizando una sensible evolución que va desde las rocas básicas hasta las rocas ácidas. Finalmente, el potasio manifiesta su gran movilidad química al paso de la diagenesis, por la fuerte dispersión de sus puntos confrontados con el índice de diferenciación (Figura 6-g).

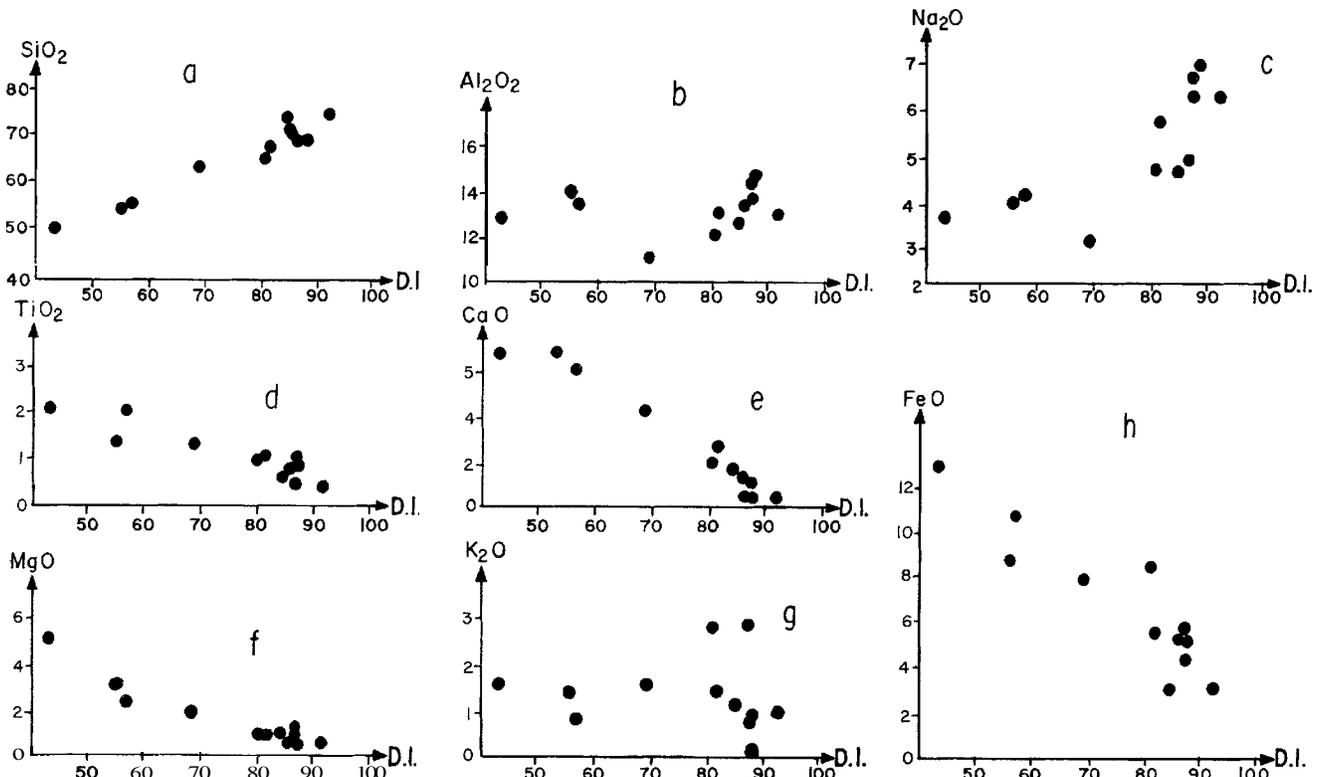


Figura 6.- Elementos mayores *versus* índice de diferenciación de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos del Arroyo La Bocana. Note-se una disminución de titanio, calcio, magnesio y hierro total, así como un leve aumento de sílice y sodio.

En el diagrama triangular A F M (alcalis-hierro total-magnesio) de la Figura 7, propuesto por Kuno (1968), las rocas estudiadas muestran una clara tendencia a agruparse en una serie calci-alcalina, desde los basaltos hasta las riolitas, sin manifestar enriquecimiento alguno en hierro.

Por otra parte, la misma hipótesis es reforzada ya que en el diagrama de Kuno (1959) en que se confronta los álcalis con la sílice, las rocas se sitúan principalmente en el campo de las series calci-alcalinas, con un enriquecimiento moderado en alcalis (Figura 8).

CLINOPIROXENOS

En la serie volcánico-sedimentaria de la Formación Alisitos en el Arroyo La Bocana, los únicos minerales ferromagnesianos que contienen las rocas volcánicas son clinopiroxenos. Estos minerales son escasos y mal distribuidos dentro de la composición mineralógica en ciertas lavas y rocas piroclásticas, pre-

sentándose como fenocristales automórfos subhedrales de 0.1 a 2 mm y desprovistos de cualquier zonamiento.

El análisis de clinopiroxenos, en estudios geoquímicos, es positivo, ya que son considerados como minerales que reflejan la composición original del magma, además de su relativa estabilidad geoquímica a través de la diagenesis.

Las muestras volcánicas que contienen clinopiroxenos AB-92, AB-102, AB-123 y AB-149 se seleccionaron para ser analizadas con microsonda electrónica en el Laboratoire de Physique des Solides de la Universidad de Paris-Sud en Francia. La posición estratigráfica de los niveles litológicos se ilustra en la Figura 2 y los resultados de los análisis efectuados se enlistan en las Tablas 2 y 3.

Los diferentes minerales analizados se caracterizan por concentraciones fuertes de sílice (49 a 53%), contrastando con porcentajes bajos de aluminio (1.47 a 4.07%), los cuales no siempre son suficientes para saturar los tetraedros. Los contenidos de sodio son bajos (0.16 a 0.37%). El calcio muestra concentraciones relativamente constantes (17.83 a 21.82%) las que generalmente se sitúan alrededor del 19.5%. El titanio varía

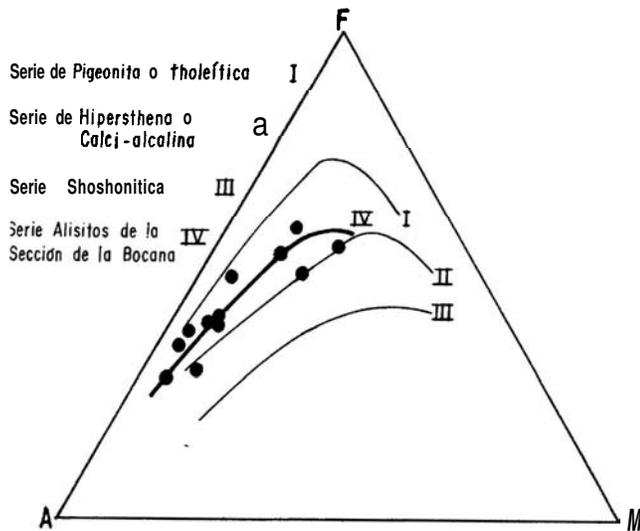


Figura 7.- Diagrama AFM de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos sensiblemente similares a la serie calci-alcalina.

de 0.42 a 1.04% y el manganeso tiene valores de 0 a 0.53%. El contenido en óxido ferroso está comprendido entre 5.21 y 11.55% y el óxido ferrico se sitúa entre 0 y 4.48%; sin embargo, estos últimos valores han sido calculados mediante un programa de computadora y podrían tener pequeños errores de precisión.

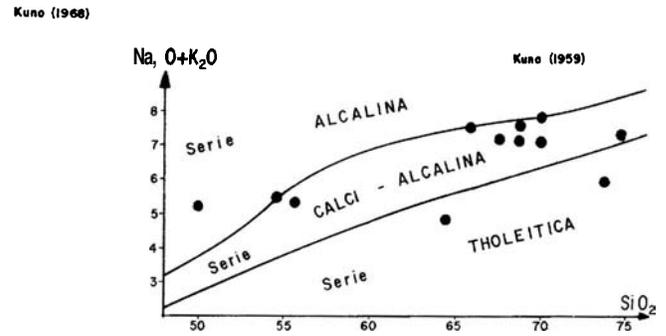


Figura 8.- La mayoría de las rocas volcánicas analizadas se ubica en el campo de las series calci-alcalinas.

Tabla 2.- Composición de los clinopiroxenos de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos de la sección de La Bocana, analizados con microsonda electrónica.

Muestra	AB-92					AB-102							
	Análisis 1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	49.86	49.65	51.61	50.39	50.84	52.78	52.31	52.36	52.63	51.87	52.66	52.04	52.34
TiO ₂	0.84	0.48	0.52	1.04	0.68	0.53	0.64	0.67	0.76	0.71	0.60	0.85	0.60
Al ₂ O ₃	2.44	4.07	1.47	1.86	2.20	2.18	2.28	2.59	1.94	2.61	2.17	2.51	2.40
Fe ₂ O ₃	4.48	2.01	0.46	0.83	2.38	0.66	0.00	0.00	0.33	0.73	0.00	0.00	0.00
FeO	6.48	9.91	11.55	10.65	9.19	9.08	8.89	8.59	9.86	8.65	8.48	9.35	9.06
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.20	0.22	0.53	0.17	0.19	0.30	0.13
MgO	15.18	12.30	12.21	12.27	15.12	16.50	15.40	14.98	15.67	15.88	15.33	14.39	15.19
CaO	20.16	20.41	21.32	21.09	19.03	18.21	18.70	18.21	18.57	18.65	18.58	19.23	17.83
Na ₂ O	0.19	0.37	0.31	0.33	0.16	0.27	0.31	0.23	0.29	0.32	0.36	0.36	0.31
Cr ₂ O ₃	0.27	0.14	0.09	0.03	0.11	0.04	0.14	0.04	0.00	0.17	0.11	0.00	0.00
TOTAL	99.90	99.34	99.54	98.49	99.71	100.61	98.87	97.89	100.58	99.76	98.48	99.03	97.86
Si	1.863	1.879	1.956	1.928	1.903	1.938	1.958	1.982	1.943	1.923	1.977	1.953	1.980
Ti	0.023	0.014	0.015	0.030	0.019	0.015	0.018	0.019	0.021	0.020	0.017	0.024	0.017
Al	0.107	0.181	0.066	0.084	0.097	0.094	0.100	0.115	0.084	0.114	0.096	0.111	0.107
Fe ³⁺	0.125	0.057	0.013	0.024	0.067	0.018	0.000	0.000	0.009	0.020	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.202	0.312	0.365	0.340	0.287	0.278	0.277	0.271	0.303	0.267	0.265	0.292	0.286
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.011	0.006	0.007	0.017	0.005	0.006	0.009	0.004
Mg	0.851	0.698	0.694	0.705	0.849	0.909	0.864	0.850	0.868	0.883	0.863	0.810	0.862
Ca	0.807	0.828	0.866	0.865	0.763	0.717	0.750	0.738	0.734	0.741	0.747	0.774	0.723
Na	0.013	0.027	0.023	0.025	0.012	0.019	0.022	0.017	0.021	0.023	0.026	0.026	0.022
Cr	0.009	0.004	0.003	0.001	0.003	0.001	0.004	0.001	0.000	0.005	0.003	0.000	0.000
En	42.87	36.83	35.81	36.47	43.21	47.29	45.69	45.72	45.35	46.21	46.03	43.18	46.07
Fs	16.47	19.47	19.50	18.78	17.96	15.40	14.65	14.58	16.30	15.02	14.13	15.56	15.29
Wo	40.65	43.69	44.69	44.75	38.83	37.30	39.66	39.70	38.35	38.77	39.84	41.26	38.64
Mg x 100 / (Mg+Fe+Mn)	72.24	65.42	64.74	65.95	70.57	74.75	75.33	75.35	72.51	75.15	76.10	72.91	74.83

En particular los valores de cromo en las rocas analizadas son tan pequeños, que los resultados obtenidos no pueden

considerarse confiables y representativos de la composición química de los clinopiroxenos.

Tabla 3.- Composición de los clinopiroxenos de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos de la sección de La Bocana, analizados con microsonda electrónica.

muestra	AB-123			AB-149									
	Análisis 1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	52.23	52.20	53.09	51.74	52.36	50.78	51.31	50.61	51.49	52.11	50.95	52.55	52.14
TiO ₂	0.68	0.82	0.71	0.58	0.55	0.53	0.42	0.60	0.50	0.62	0.52	0.58	0.46
Al ₂ O ₃	2.76	2.46	2.23	2.38	2.90	3.08	2.96	2.89	2.82	2.29	2.88	3.00	2.80
Fe ₂ O ₃	2.67	2.09	0.54	0.00	0.00	0.43	0.31	1.86	2.74	0.00	0.72	1.58	0.84
FeO	9.34	8.07	10.17	9.00	7.29	8.13	8.02	6.51	5.21	8.61	7.65	6.06	7.00
MnO	0.00	0.00	0.00	0.25	0.19	0.20	0.29	0.21	0.31	0.29	0.17	0.30	0.51
MgO	16.51	15.47	15.75	15.11	15.32	14.91	15.16	15.13	15.46	15.06	14.37	15.51	14.70
CaO	17.90	20.39	19.12	18.91	20.28	19.58	19.52	20.39	21.44	19.95	20.59	21.82	21.45
Na ₂ O	0.26	0.27	0.27	0.32	0.27	0.23	0.27	0.24	0.28	0.25	0.31	0.27	0.31
Cr ₂ O ₃	0.00	0.07	0.07	0.08	0.26	0.07	0.10	0.16	0.29	0.00	0.27	0.34	0.18
TOTAL	102.35	101.84	101.95	98.37	99.42	97.94	98.36	98.60	100.54	99.18	98.43	102.01	100.39
Si	1.896	1.905	1.934	1.947	1.942	1.918	1.927	1.899	1.893	1.946	1.919	1.903	1.923
Ti	0.018	0.023	0.019	0.016	0.015	0.015	0.012	0.017	0.014	0.017	0.015	0.016	0.013
Al	0.118	0.106	0.096	0.105	0.126	0.137	0.131	0.128	0.122	0.101	0.128	0.128	0.122
Fe ³⁺	0.073	0.057	0.015	0.000	0.000	0.012	0.009	0.052	0.076	0.000	0.020	0.043	0.023
Fe ²⁺	0.282	0.245	0.309	0.282	0.225	0.256	0.251	0.203	0.160	0.268	0.240	0.183	0.215
Mn	0.000	0.000	0.000	0.008	0.006	0.006	0.009	0.007	0.010	0.009	0.005	0.009	0.016
Mg	0.899	0.847	0.861	0.853	0.852	0.845	0.854	0.852	0.853	0.843	0.811	0.842	0.813
Ca	0.696	0.797	0.746	0.762	0.806	0.792	0.785	0.820	0.845	0.798	0.831	0.847	0.848
Na	0.018	0.019	0.019	0.023	0.020	0.017	0.020	0.017	0.020	0.018	0.023	0.019	0.022
Cr	0.000	0.002	0.002	0.002	0.008	0.002	0.003	0.005	0.008	0.000	0.008	0.010	0.005
En	46.10	43.50	44.59	44.96	45.25	44.36	44.97	44.21	44.11	44.16	42.64	43.97	42.81
Fs	18.21	15.56	16.78	14.87	11.95	14.07	13.69	13.23	12.20	14.04	13.67	11.80	12.53
Wo	35.69	40.93	38.63	40.17	42.80	41.57	41.34	42.55	43.69	41.80	43.69	44.23	44.66
$\frac{Mg \times 100}{Mg+Fe+Mn}$	71.69	73.72	72.66	74.63	78.74	75.51	76.05	76.48	77.62	75.27	75.37	78.18	76.19

De acuerdo con la clasificación de Poldervaart y Hess (1951), los valores relativos de En, Fs y Wo de los clinopiroxenos estudiados se ubican en el campo de las augitas (Figura 9).

En proximidad con el campo de las salitas. Las fórmulas estructurales de la augita (Tablas 2 y 3) muestran una ligera tendencia magnésiana del mineral.

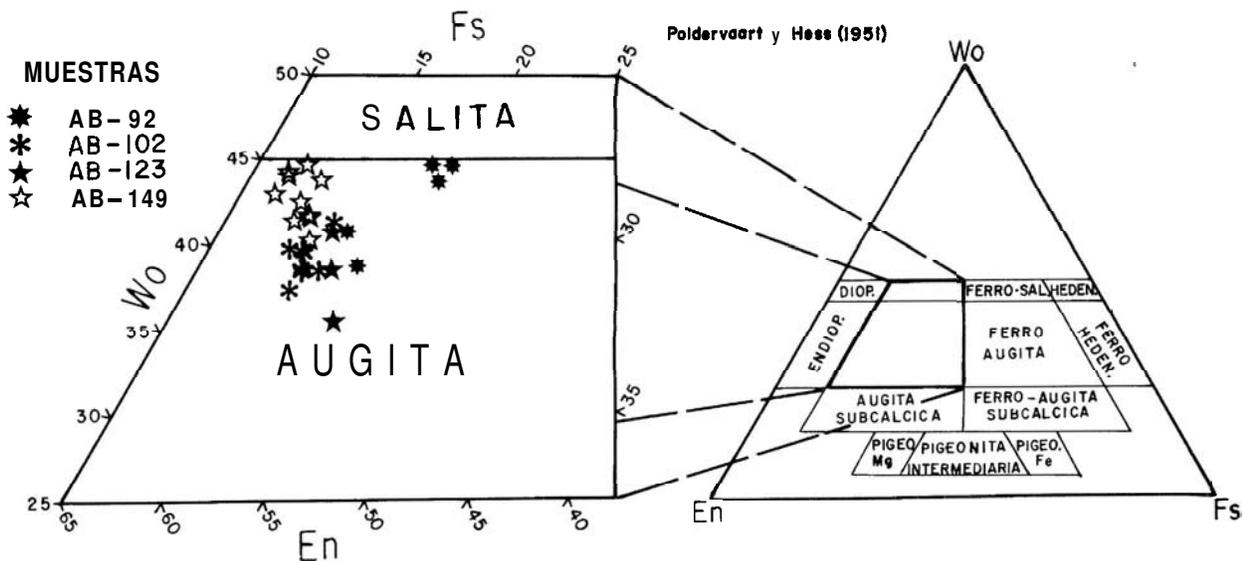


Figura 9.- El clinopiroxeno característico del material volcánico de la Formación Alisitos es una augita situada cerca del campo de la salita.

El diagrama triangular de la Figura 10, propuesto por Le Bas (1962), permite constatar que las augitas analizadas se localizan preferentemente en el dominio de los clinopiroxenos que caracterizan a conjuntos de rocas alcalinas, con una leve dispersión hacia el campo de las rocas peralcalinas.

Por otra parte, la confrontación del titanio con el calcio y el sodio en la serie de diagramas propuesta por Leterrier y colaboradores (1982) demuestra, en primera instancia, que los clinopiroxenos se sitúan dentro del campo toleítico/calci-

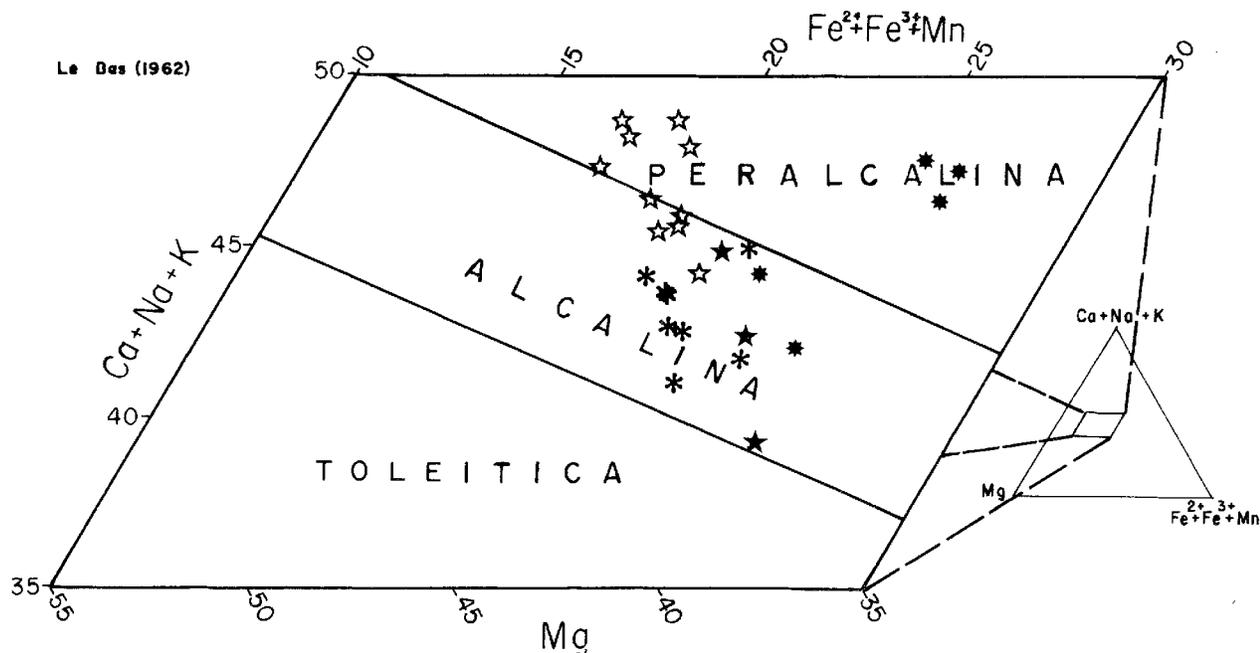


Figura 10.- Los clinopiroxenos de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos se sitúan en el campo de las series alcalinas con cierta tendencia hacia el campo de las series peralcalinas.

alcalino (Figura 11-a). Enseguida y tomando en consideración la relación $Ti + Cr/Ca$, se observa que los minerales se sitúan preferentemente en el campo de las rocas orogénicas (Figura 11-b). Finalmente, después de confrontar el titanio y el aluminio de las fórmulas estructurales, se encontró que las augitas analizadas de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos corresponden a clinopiroxenos de series calci-alcalinas (Figura 11-c).

ELEMENTOS TRAZA

Los elementos traza y ciertos elementos higromagmatofílicos, particularmente el uranio, torio, lantano, tantalio y hafnio (Joron y Treuil, 1977), permitieron apoyar los resultados obtenidos con anterioridad en el estudio de los elementos mayores y los clinopiroxenos.

Las muestras volcánicas de la Formación Alisitos AB-90, AB-92, AB-99, AB-109, AB-120, AB-141, AB-143 y AB-144 fueron seleccionadas para el estudio geoquímico de sus valores en elementos traza. La posición estratigráfica relativa de los niveles litológicos muestreados se ilustra en la Figura 2.

El análisis de las rocas se efectuó en el Laboratoire de Saclay, en Francia, donde fueron colocadas en un contenedor de cadmio e irradiadas con un flujo de neutrones de 2.5×10^{14} n/cm²/seg en el interior de un reactor Osiris. La espectrometría gama se hizo con ayuda de un detector Ge(Li) de

2 Kev de resolución para la línea de 1,333 Kev del ⁶⁰Co, según un método que permite la cuantificación simultánea de una veintena de elementos traza (Chayla *et al.*, 1973). Los resultados en elementos traza obtenidos de las rocas volcánicas se muestran en la Tabla 4.

Las relaciones lineales entre los elementos higromagmatofílicos realzan un sensible aumento en dichos elementos, a medida que se pasa de las rocas magmáticas menos diferenciadas a las más evolucionadas (Figura 12). Los valores promedio entre el torio y los demás elementos higromagmatofílicos son $Th/U = 2.69$, $Th/Ta = 5.04$, $Th/La = 0.23$ y $Th/Hf = 0.33$.

Taylor (1965) estableció el valor de 3 para la relación torio/uranio y de 400 para la de potasio/rubidio como característicos de rocas de arcos insulares. En el presente caso estos valores son muy próximos, ya que en promedio resulta 2.69 para la relación Th/U y 472 para la de K/Rb . Posteriormente, Taylor (1969) establece que las andesitas de series calci-alcalinas de arcos insulares contienen en promedio 59% de SiO_2 , 1.6% de K_2O y 31 ppm en rubidio, los cuales son valores análogos a los de la muestra AB-109 del grupo de rocas analizadas.

Sin embargo, el contenido de 423 ppm de bario en la misma muestra (AB-109) es muy bajo en relación con 1,000 ppm encontradas por Jakes y Smith (1970) en una roca con 63% de SiO_2 . Por el contrario, la media de 472 ppm para la

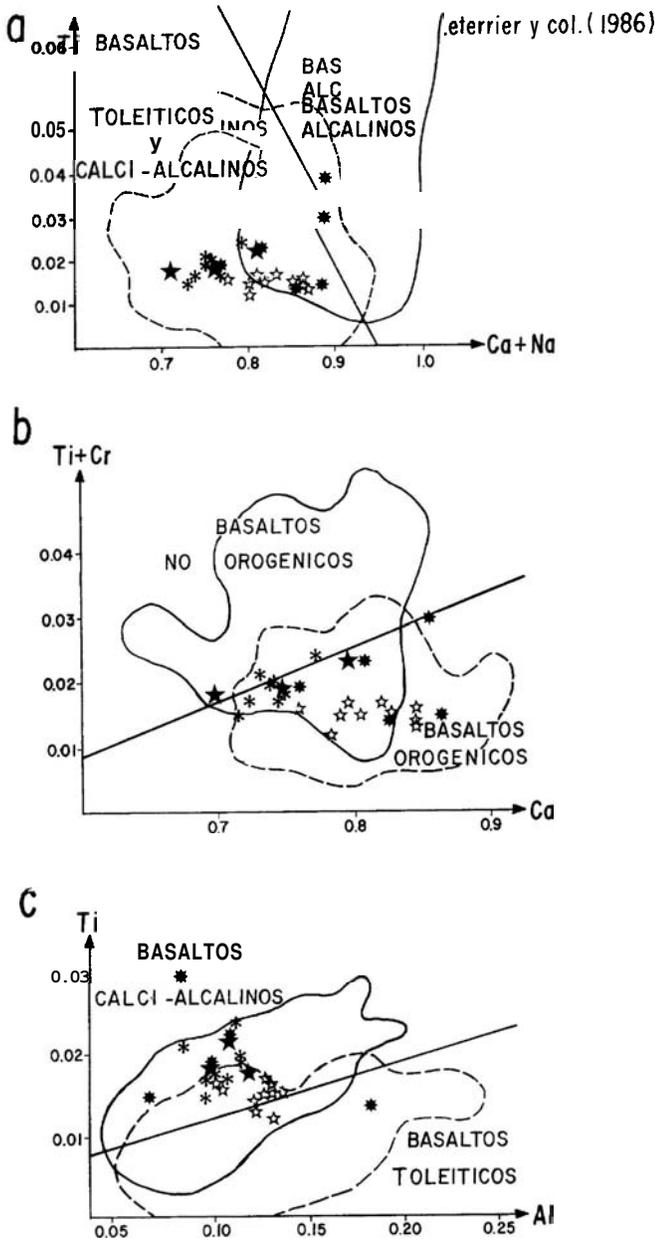


Figura 11.- a) La primera discriminación propuesta por Letertier y colaboradores (1982) muestra que el contenido del titanio confrontado con el calcio más el sodio de los clinopiroxenos de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos es particular de las series toleíticas y calci-alcalinas. b) Al comparar el titanio más el cromo con el calcio de los clinopiroxenos estudiados en su mayoría caen en el campo de rocas volcánicas orogénicas. c) En la tercera discriminación se observa claramente, al confrontar el titanio y el aluminio, que los clinopiroxenos de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos del Arroyo La Bocana son característicos de las series calci-alcalinas.

relación K/Rb de la Formación Alisitos del Arroyo La Bocana es muy próxima a 500 ppm determinadas por los mismos autores en rocas volcánicas de series calci-alcalinas de arcos insulares.

Existe una gran similitud en valores de elementos traza, que se hace evidente al realizar la comparación entre las muestras volcánicas analizadas de la Formación Alisitos y ejem-

Tabla 4.-Análisis de los elementos traza de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos de la sección de La Bocana.

		AB-90	AB-92	AB-99	AB-109	AB-120	AB-141	AB-143	AB-144
SiO ₂	%	54.42	50.11	67.45	64.33	68.75	74.54	69.61	73.69
U	ppm	0.59	0.55	1.15	0.57	1.48	1.08	1.03	1.22
Th	ppm	1.64	1.40	2.82	1.38	2.76	2.56	2.57	2.77
Ta	ppm	0.38	0.32	0.63	0.32	0.58	0.40	0.40	0.53
Hf	ppm	5.36	4.08	9.25	4.67	7.60	7.31	7.33	8.98
Zr	ppm	225	168	332	191	309	261	274	309
Sc	ppm	29.8	54.1	18.9	25.3	19.9	9.22	11.1	11.2
Co	ppm	16.6	36.0	3.63	15.7	3.03	2.59	4.59	2.85
Ni	ppm	15.5	22.3	5.94	6.86	4.59	6.59	5.23	3.45
Rb	ppm	25.8	28.3	18.5	32.8	14.2	11.4	7.44	19.8
Cs	ppm	0.14	0.29	0.10	0.18	0.14	0.08	0.06	0.09
Ba	ppm	313	438	383	423	148	187	152	445
Sr	ppm	297	190	173	143	129	71.4	78.9	146
Sb	ppm	0.55	1.30	0.93	0.78	1.85	0.22	0.27	0.99
Cr	ppm	148	139	177	68.0	141	154	116	58.3
Zn	ppm	190	539	582	1050	719	215	283	98.1
As	ppm	2.0	3.4	4.4	12.1	6.3	1.6	2.3	2.5
La	ppm	9.5	9.2	11.6	12.0	17.4	11.0	5.3	10.8
Tb	ppm	1.07	1.08	1.39	1.27	1.65	1.25	0.97	1.30
Eu	ppm	1.86	1.64	2.19	2.30	2.93	1.86	1.21	1.66

plos conocidos de series calci-alcalinas de arcos insulares de diferentes partes del mundo. En efecto, la Tabla 5 permite constatar la analogía de valores de casi todos los elementos traza, a excepción del cromo y circonio donde la Formación Alisitos presenta concentraciones más elevadas.

CONCLUSIONES

La geoquímica del material volcánico de la Formación Alisitos del Arroyo La Bocana revela la actividad de un arco insular calci-alcalinocercano a la margen occidental de América del Norte durante el Aptiano-Albiano, que favoreció la creación de cuencas marginales de aguas someras y tropicales.

Las rocas estudiadas forman dos grupos de diferente composición magmática; el primero representado escasamente por algunos basaltos y andesitas, como rocas menos evolucionadas, que podrían representar parte de la paleocorteza oceánica, la cual pudo estar asociada a la fusión parcial de la corteza continental, que originó el segundo grupo más difundido a lo largo de la columna estratigráfica y caracterizado por dacitas, riódacitas y riolitas como productos de una diferenciación magmática más avanzada. El reducido número de muestras analizadas, debido a la pobre conservación litológica, ha limitado la posibilidad de encontrar los términos intermedios entre los dos grupos y constatar claramente la diferenciación magmática continua y regular que se aprecia levemente en los diagramas correspondientes al índice de diferenciación.

La concentración de los elementos mayores revela la sensible acción de fenómenos diagenéticos como una lixiviación parcial del potasio y un leve enriquecimiento en sodio.

Mineralógicamente el clinopiroxeno, característico del material volcánico genético, es una augita con ligera tendencia magnesiana.

La cantidad en elementos traza de las lavas estudiadas y la interrelación de los elementos higromagmatofílicos corroboran la naturaleza calci-alcalina propia de arcos insulares de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos del Arroyo La Bocana.

Tomando en cuenta lo anterior, se concluye que la serie volcánico-sedimentaria de la Formación Alisitos que aflora en Baja California Norte representa la prolongación austral

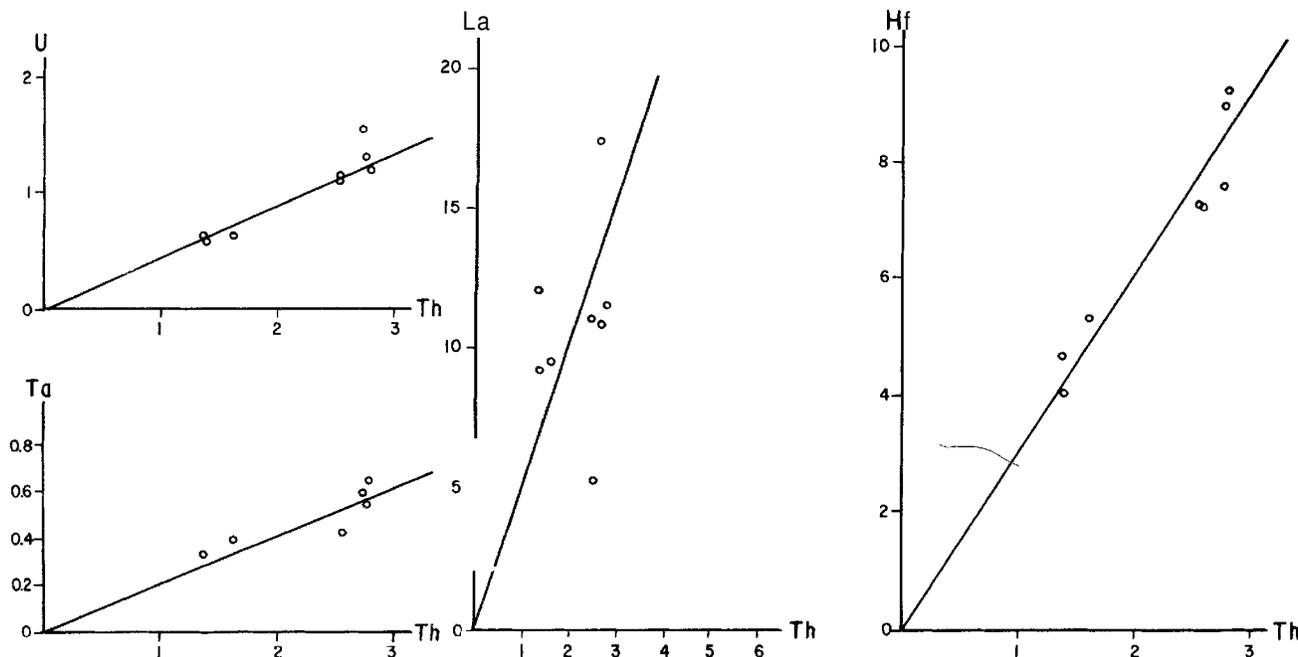


Figura 12.- Al comparar elementos hidromagmatofílicos como el uranio, tantalio, lantano y hafnio, o — torio, de las rocas volcánicas de la Formación Alisitos del Arroyo La Bocana, se observa una relación lineal sensible.

Tabla 5.- Similitud de valores de ciertos elementos traza de series calci-alcálinas de diferentes regiones del mundo con las rocas volcánicas de la Formación Alisitos.

	Series calci-alcálinas de arco insular (1)			Fiji (2)	Japón (3)	Formación Alisitos (4)		
	Basalto	Andesito	Dacita			AB-92	AB-90	AB-109
SiO ₂ %	52	58	63	58.8	59.2	50.41	54.42	64.33
K ₂ O %	-	-	-	1.25	1.06	1.57	1.41	1.59
Rb ppm	10	30	45	20	24	28.3	25.8	32.8
K/Rb ppm	340	430	380	443	313	393	388	344
Ba ppm	115	270	520	354	282	438	313	423
Sr ppm	330	385	460	489	330	190	297	143
La ppm	9.6	119	14	-	-	9.2	9.5	12
Th ppm	11	2.2	1.7	-	-	1.40	1.64	1.38
U ppm	0.2	0.7	0.6	-	-	0.55	0.59	0.57
Th/U ppm	5.9	3.2	2.7	-	-	2.54	2.78	2.42
Ni ppm	25	18	5	-	-	22.3	15.5	6.86
Cr ppm	40	25	13	-	-	139	148	68
Zr ppm	100	110	100	-	-	168	225	191
Hf ppm	2.6	2.3	3.8	-	-	4.08	5.36	4.67

(1) Jakes y White (1972); (2) Gill (1970); (3) Taylor y White (1966); (4) Sección de la Bocana (1983)

del Sistema Cordillerano de California en los Estados Unidos de America, particularmente de las unidades Great Valley y Franciscan en las Montañas Klamath y en el flanco oriental de la Sierra Nevada. Su litología refleja una compleja evolución magmática de arco insular, favorecida por la subducción de la placa Farallon en su movimiento hacia el noroccidente respecto a la Placa de America del Norte, durante el Aptiano-Albiano, propiciando las condiciones particulares para que se mezclaran dos ambientes diferentes de depósito. Por una parte, en condiciones marinas de aguas someras y tropicales, se produjo la sedimentación de material epiclastico, el desarrollo de rocas carbonatadas biogénicas y la proliferación de una gran variedad de moluscos y, en contraparte, la presencia de grandes volúmenes de rocas volcánicas, principalmente piroclásticas, con marcada estructura ignimbrítica, atestiguan un

ambiente de depósito en condiciones subaéreas y subacuáticas localmente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Allison, E. C., 1955, Middle Cretaceous gastropoda from Punta China, Baja California, Mexico: Jour. Paleontology, v. 29, p. 400-432.

---1974, The type Alisitos Formation (Cretaceous Aptian-Albian) of Baja California and its bivalve fauna: in Geology of Peninsular California. San Diego, Calif., Am. Assoc. Petroleum Geologists, Guidebook, p. 20-59.

Beal, C. H., 1924, Informe sobre exploración geológica de la Baja California, por la Marland Oil Company of Mexico: Bol. del Petróleo, v. 17, p. 417-453; v. 18, p. 15-53 (inedito).

Chayla, D., Jaffrezic, H., y Joron, J. L., 1973, Analyse par activation dans les neutrons epithermiques; application a la détermination d'éléments en traces dans les roches: Compt. Rend. Acad. Sci. Paris, t. 277, p. 273-275 (resumen).

Cross, Withman, Iddings, J. P., Pirsson, L. V., y Washington, H. A., 1903, Quantitative classification of igneous rocks: Chicago, Univ. Chicago Press, p. 185-231.

Darton, N. H., 1921, Geologic reconnaissance in Baja California, Mexico: Jour. Geology, v. 29, p. 720-748.

Gill, J. B., 1970, Geochemistry of Viti Levu, Fiji and its evolution as an island arc: Contr. Mineral. Petrology, v. 27, p. 179-203.

Jakes, P., y Smith, I. E., 1970, High potassium calc-alkaline rocks, Cape Nelson, eastern Papua: Contr. Mineral. Petrology, v. 28, p. 259-271.

- Jakes, P., y White, A. J. R., 1972, Major and trace element abundances in volcanic rock of orogenic areas: *Geol. Soc. America Bull.*, v. 83, p. 29-40.
- Joron, J. L., y Treuil, M., 1977, Utilization des elements for-temment hygromagmalophiles pour l'etude de la composition chimique et l'heterogeneite du manteau: *Bull. Soc. Geol. France*, t. XIX, n. 6, p. 1197-1205.
- Kirk, M. V., y MacIntyre, J. R., 1951, Cretaceous deposits of the Punta San Isidro area, Baja California: *Geol. Soc. America Bull.*, v. 62, p. 1505 (resumen).
- Kuno, H., 1959, Origin of Cenozoic petrographic provinces of Japan and surrounding areas: *Bull. Volcanol.*, v. 20, p. 37-76.
- 1968, Origin of andesite and its bearing on the island arc structure: *Bull. Volcanol.*, v. 32, p. 141-176.
- Le Bas, M. J., 1962, The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage: *Am. Jour. Sci.*, v. 260, p. 267-288.
- Leternier, Jacques, Maury, R. C., Thonon, P., Girard, D., y Marchal, M., 1982, Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series: *Earth and Planet. Sci. Letters*, v. 59, p. 139-154.
- Peccerillo, A., y Taylor, S. R., 1976, Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey: *Contr. Mineral. Petrology*, v. 58, p. 63-81.
- Poldervaart, A., y Hess, H. H., 1951, Pyroxenes in the crystallization of basaltic magmas: *Jour. Geology*, v. 59, p. 472-489.
- Rangin, Claude, 1978, Speculative model of Mesozoic geodynamics, central Baja California to northeastern Sonora, Mexico: in Howell, D. G., and McDougall, K. A., eds., *Mesozoic paleogeography of the western United States*. Los Angeles, Soc. Econ. Paleontologists and Mineralogists, Pacific Sect. Pacific Coast Paleogeography Symp., 2, p. 85-106.
- Reed, R. G., 1967, Stratigraphy and structure of the Alisitos Formation near El Rosario: San Diego, Univ, San Diego, tesis de maestria, 118 p. (inedita).
- Santillan, Manuel, y Barrera, Tomas, 1930, Las posibilidades petroliferas en la costa occidental de la Baja California, entre los paralelos 30 y 32° de latitud norte: *Inst. Geol. Mexico, Anales*, v. 5, p. 1-37.
- Silver, L. T., Stehli, F. G., y Allen, C. R., 1963, Lower Cretaceous pre-batholithic rocks of northern Baja California, Mexico: *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, v. 47, p. 2054-2059.
- Taylor, S. R., 1965, The application of trace element data to problems in petrology: *Phys. Chem. Earth*, v. 6, chap. 2, p. 133-213.
- 1969, Trace element chemistry of andesite and associated calc-alkaline rocks: *Proc. Andesite Conf. Upper Mantle Project*, Oregon State Sci. Rept. 16, p. 43-63.
- Taylor, S. R., y White, A. J. R., 1969, Trace element abundances in andesites: *Bull. Volcanol.*, v. 29, p. 177-194.
- Thornton, C. P., y Tuttle, O. F., 1960, Chemistry of igneous rocks; I, differentiation index: *Am. Jour. Science*, v. 258, p. 664-684.
- Williams, Harold, Turner, J. F., y Gilbert, C. M., 1955, *Petrography*: San Francisco, Freeman, 406 p.
- Woodford, A. O., y Harris, T. F., 1938, Geological reconnaissance across Sierra San Pedro Martir, Baja California, Mexico: *Geol. Soc. America Bull.*, v. 49, p. 1297-1336.
- Manuscrito presentado: 7 de Mayo de 1984.
 Manuscrito corregido devuelto por el autor: 8 de agosto de 1985.
 Manuscrito aceptado: 11 de mayo de 1987.