

Algunas consideraciones mineralógicas y geoquímicas sobre la amazonita del estado de Chihuahua, México

Mikhail Ostrooumov

*Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas,
Departamento de Geología y Mineralogía,
Francisco J. Mujica s/n, Ciudad Universitaria, Edificio U, 58030 Morelia, Michoacán, México.
ostrooum@umich.mx*

RESUMEN

En el presente trabajo se examinan los factores que inciden en la distribución geológica de la amazonita, y en la relación existente entre sus yacimientos y tipos específicos de granitoides. Se describen las condiciones geoquímicas de su formación, así como los atributos tipomórficos de la amazonita. Se proporcionan nuevos datos sobre el reciente hallazgo y las particularidades químicas de la amazonita en el estado de Chihuahua, México (depósito Cerros Bahues, Municipio Coronado). Se observa una evolución química de la amazonita de los granitos a las pegmatitas por el aumento de las concentraciones de K_2O , Rb_2O , Cs_2O , PbO , Sr , U y Th y la disminución de la concentración de Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3 y Ba . Los resultados obtenidos de los difractogramas de rayos X y los espectros infrarrojos de reflexión indican que todas las amazonitas analizadas se caracterizan por un alto grado de ordenamiento Al/Si (triclinicidad $\Delta > 0.90$), lo que permite caracterizarlas como microclina ordenada. Los parámetros colorimétricos de la amazonita estudiada son: $\lambda = 495-503$ nm, $P = 10-12\%$, $Y = 34.7-35.3\%$. Los atributos tipomórficos y de coloración de la amazonita mexicana son muy parecidos a los de las amazonitas en granitoides subalcalinos (Transbaikal, Siberia, Rusia). La cristalquímica y los parámetros espectrométricos de las amazonitas pueden ser importantes índices en la prospección y evaluación de diversos yacimientos minerales que contienen metales económicos (Ta , Nb , Sn) y tierras raras.

Palabras clave: amazonita, atributos tipomórficos, México.

ABSTRACT

This work characterizes the distinctive features that influence the geological setting of amazonite, as well as the relationship between their deposits and specific genetic types of granitoids. Mineralogical and geochemical conditions of the amazonite formation as well as the typomorphic attributes are described. New information about finding and geochemical features of the Mexican amazonite is here presented (deposit Hills Bahues, Coronado municipality). There is a chemical evolution of the amazonite from granites to pegmatites, characterized by increasing amounts of K_2O , Rb_2O , Cs_2O , PbO , Sr , U y Th , and by decreasing amounts of Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3 and Ba . The amazonite characterized by a high degree of Al/Si order. All the parameters obtained from X-ray diffraction ($\Delta > 0.90$) and infrared reflection spectroscopy show that the studied amazonite belong to the maximum ordered microcline. The colorimetric parameters of the Mexican amazonite are: $\lambda = 495-503$ nm, $P = 10-12\%$, $Y = 34.7-35.3\%$. The typomorphic features and color for different amazonite generations from Hills Bahues deposit are close to the amazonites from

subalkaline granitoids (Transbaikal, Siberia, Russia). The crystal chemical and spectrometric parameters of amazonite may be important for the exploration of diverse deposits of rare metals (Ta, Nb, Sn) and REE mineralizations and their economic evaluation.

Key words: amazonite, typomorphic features, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La amazonita - una variedad de los feldespatos alcalinos de matices verde-azules - pertenece a los objetos minerales que han llamado la atención de los mineralogistas desde hace muchas generaciones. Entre los científicos que investigaron diferentes aspectos de su composición, estructura y diversas propiedades se encuentran los famosos corifeos de la geología y mineralogía de los siglos XIX-XX y de los diferentes países europeos: A. des Cloiseaux, y A. Lacroix (Francia), V. Goldschmidt (Alemania), N. Kokcharov, V. Vernadsky, y A. Fersman (Rusia) y muchos otros. Durante los últimos años se han dedicado numerosas investigaciones y publicaciones que abordan diversas particularidades de la cristalografía, propiedades y génesis de la amazonita (Ostrooumov *et al.*, 2008 y trabajos citados). En estos trabajos se recopilan diversos datos sobre la geología, mineralogía, cristalografía y los atributos tipomórficos de la amazonita.

Es bien conocido que muchos mineralogistas y coleccionistas de minerales aprecian la amazonita por los matices verde-azules (Figura 1) que presenta este mineral. La naturaleza del color de la amazonita ha sido objeto de investigación desde hace casi doscientos años. La hipótesis sobre la relación entre el color de la amazonita y la impureza isomorfa de plomo, hasta hoy en día es la más aceptada (Marfunin y Bershov, 1970; Hofmeister y Rossman, 1985; Petrov *et al.*, 1993; Julg, 1998). Sin embargo, se han propuesto otras hipótesis según las cuales el color se relacionaría con impurezas de hierro, agua estructural, grado de orden/desorden, Al/Si en la estructura cristalina, etc. (Ostrooumov *et al.*, 2008; Szuzkiewicz y Körber, 2010). El color de la amazonita tiene causas complejas que reflejan una amplia variación de sus propiedades químicas y estructurales.

En las últimas décadas (p.ej. Feldman *et al.*, 1967; Kovalenko *et al.*, 1971; Voloshin y Pakhomovsky, 1986; Ercit, 2005; Ostrooumov y Banerjee, 2005; Martin *et al.*, 2008; Ostrooumov *et al.*, 2008) se ha evaluado el uso de la amazonita en la búsqueda y prospección de yacimientos minerales que están relacionados con los complejos granitoides específicos, los cuales contienen importantes metales económicos (Ta, Nb, Sn) y tierras raras.

El primer hallazgo de amazonita en México se ha llevado a cabo al principio de este siglo por los geólogos de la Compañía Minera Cascabel S.A. (P. Megow, comunicación personal), y algunas de sus propiedades cristalográficas se han descrito por Ostrooumov y Robles-Camacho (2007). Tomando en cuenta una serie de estudios sobre la amazonita que fueron realizadas anteriormente (Barker *et al.*, 1975; Foord y Martin, 1979; Ostrooumov, 1982; Ostrooumov,

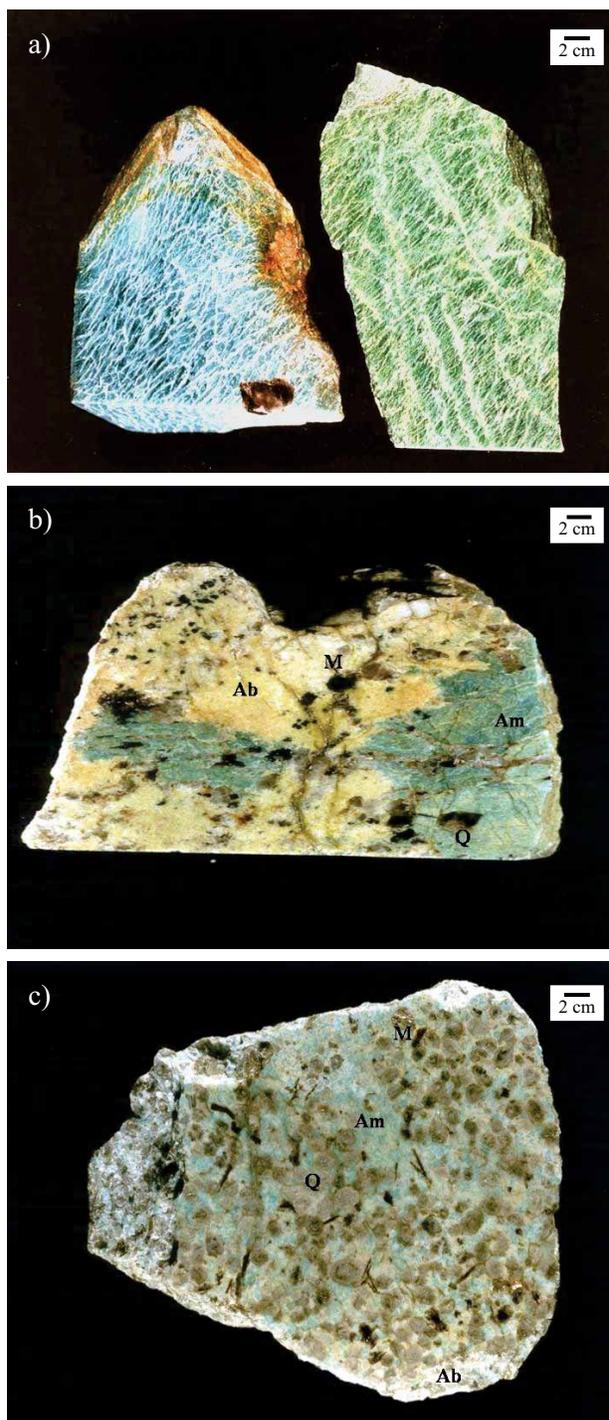


Figura 1. a-c. Gama de colores en diferentes ejemplares de amazonitas. Procedencias: a - pegmatitas precámbricas, b-pegmatitas paleozoicas, c-granitoides mesozoicos (Am-amazonita; Ab-albita; Q-cuarzo; M-mica).

1991; Cassedanne, 1994; De Vito *et al.*, 2006; Ostrooumov *et al.*, 2008), se han tratado de evaluar varios aspectos mineralógicos y geoquímicos que, por un lado, están relacionados con este hallazgo y por otro, muestran su significado importante en las investigaciones mineralógicas y geoquímicas contemporáneas (p.ej. la capacidad de acumular elementos alcalinos raros y como consecuencia convertirse en una materia prima potencial para su explotación; la posibilidad de ser utilizada para la determinación de la edad radiométrica y de servir como el indicador genético y mineralógico de los complejos granitoides). Finalmente, no cabe la menor duda de que la amazonita siempre ha sido, es y será el atractivo y popular mineral gemológico utilizado ampliamente en el mundo entero (Brito-Barreto y Bretas-Bittar, 2010).

GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA DE LA AMAZONITA

Hasta hace medio siglo, la amazonita era considerada como una variedad mineralógica muy rara. Actualmente, el número de yacimientos grandes de amazonita es de más de un centenar. De acuerdo con Ostrooumov *et al.* (2008), este mineral se ha encontrado en todos los continentes, menos

en la Antártida, y en muchos países del mundo (p.ej., EUA, Canadá, Rusia, Brasil, Egipto, Mongolia, China y Japón).

Los yacimientos de amazonita se hallan en varios tipos genéticos de complejos granitoides (granitos y pegmatitas de diferente tipo, aplitas, vetas hidrotermales, formaciones subvolcánicas), que se caracterizan por diferente posición petrológica y geoquímica. No obstante, los principales yacimientos de esta variedad mineral están relacionados con granitos y pegmatitas asociadas.

En el curso del ciclo tectono-magmático de inversión (Belousov, 1975; Smirnov, 1976; Beskin, 1979; Ostrooumov *et al.*, 2008) se conforman diversos tipos de complejos de granitoides, incluyendo el granodiorítico, el granítico, el leucogranítico-alaskítico, el subalcalino leucogranítico (rico en flúor y litio) y el alcalino granítico, que se diferencian claramente por sus características geoquímicas (Tabla 1). En relación con los macizos granodioríticos y graníticos no se conocen yacimientos de metales raros. Los macizos leucogranítico-alaskíticos contienen diversos tipos de yacimientos: los pegmatíticos de berilio (sin litio) y niobio-tántalo, y los greisen de cuarzo-berilo con estaño, wolframio, molibdeno y bismuto. Las intrusiones de granito subalcalino generan, en cúpulas y apófisis, depósitos filonianos (tipo greisen) de estaño, tántalo, niobio, talio, litio, be-

Tabla 1. Contenido medio (ppm) de elementos traza en las rocas de los complejos de granitoides.

Elemento	Complejos de granitoides					Valor medio en los granitoides (según Vinogradov, 1962)
	Grano-diorítico	Granítico	Leuco-granítico-alaskítico	Subalcalino-leuco-granítico	Alcalino-granítico	
Cr	40	20	9	4	5	25
V	70	30	15	5	3	40
Co	10	7	2.5	2	1	5
Ni	15	10	4	2	1	8
Cu	25	18	12	10	5	20
F	600	700	1400	3800	1600	800
B	12	18	35	12	7	15
Rb	110	190	290	600	260	200
Li	25	40	75	220	90	40
Cs	1.3	3.2	8	25	9	5
Tl	0.5	0.8	1.3	3	1.3	1.5
Be	0.2	3	6	9	5	5.5
Sr	400	300	100	20	30	300
Ba	850	700	250	50	75	830
Sn	3.9	6	9	20	7.6	3
W	0.8	1.9	3	4.3	1.2	1.5
Mo	1	1.5	1.5	1.4	0.8	1
Zn	75	50	33	30	80	60
Pb	26	30	36	40	40	20
Zr	130	170	200	150	800	200
Hf	1	1.5	5	7	21	1
Nb	7	17	23	80	120	20
Ta	0.8	1.5	3.6	10	6	3.5
TR+Y	120	180	260	350	500	185
U	2	4.6	8	9	10	3.5
Th	7.5	25	38	40	42	18

Nota. Tabla configurada con contenidos promedio de los elementos en distintos granitoides, a partir de Vinogradov (1962), Beskin (1979) y Ostrooumov *et al.* (2008). TR: Elementos de las tierras raras.

nilio, flúor, y, más raramente, de rubidio, cesio y wolframio. A las cúpulas y apófisis de los granitos alcalinos se asocian depósitos pegmatíticos y metasomáticos con niobio, tierras raras, zirconio, flúor, berilio y torio (a veces con plomo).

Las manifestaciones de amazonita están vinculadas con tres tipos de granitoides: a) los leucogranitos alaskíticos, b) los granitos subalcalinos y c) los granitos alcalinos. La mayoría de los yacimientos de amazonita en pegmatitas se encuentran en los límites de plataformas precámbricas, como la Siberiana, la Norteamericana, la Australiana y los escudos Ucraniano, Índico, Báltico y de Groenlandia (Figura 2). También se presentan en los macizos granitoides relacionados con el Cinturón Orogénico Kimmeriano, en la región del Baikal (Rusia) y en Mongolia, y, en menor grado, con las orogénias Caledoniana y Herciniana.

La edad de las rocas en las que se encuentra la amazonita varía en un gran espectro, desde el Proterozoico al Terciario. A los complejos más antiguos (Proterozoico) se vinculan las pegmatitas amazoníticas de granitos alcalinos, como en la Península de Kola y en Siberia Oriental, donde el proceso de formación de la amazonita a veces alcanza un máximo, tanto en intensidad como en homogeneidad y diversidad de coloración. A los complejos más jóvenes (Jurásico-Cretácico), se asocian algunos granitos subal-

calinos, como sucede en la región del Transbaikal, Rusia, y en Mongolia, China, Egipto, donde la formación de la amazonita abarca macizos completos, pero la intensidad del color de esta variedad feldespática es mucho más débil que en los cuerpos de las pegmatitas amazoníticas de los granitos alcalinos de la Península de Kola.

Recientemente, en los Alpes Orientales y en el Pamir Central se han descubierto pegmatitas con la amazonita de edad eocénica (alrededor de 40 millones de años). Desde el punto de vista genético y espacial, los complejos más antiguos (precámbricos) y profundos son las pegmatitas que están ligadas con grandes macizos de granitos alcalinos, mientras que los más recientes (mesozoicas) y menos profundos son los granitos subalcalinos (de tipo F-Li), donde la amazonita es el mineral esencial.

Analizando la ocurrencia de la amazonita en el tiempo geológico se ha establecido un considerable incremento hacia las épocas más jóvenes en edad geológica, tanto por su mayor grado de diversidad genética como por la escala de sus manifestaciones (macizos granitoides). Por otro lado, las amazonitas de los complejos más antiguos se distinguen por su color más intenso y por una variedad de matices más rica. Estas amazonitas se encuentran solo en las pegmatitas precámbricas de Canadá y Rusia.

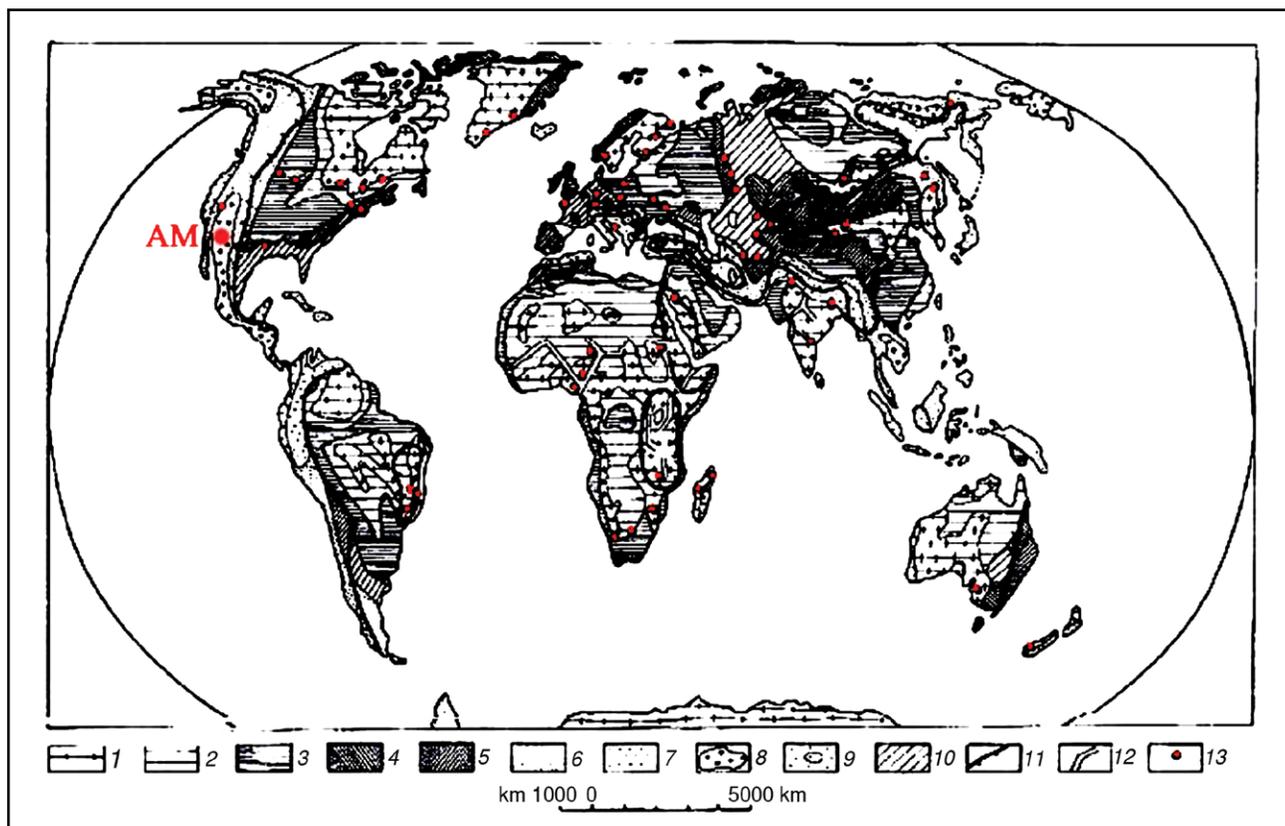


Figura 2. Distribución de los principales yacimientos de amazonita (esquema tectónico por Belousov, 1975): 1: escudos, 2: pendientes de escudos y anteclisas de plataformas antiguas, 3: sineclisas de plataformas antiguas, 4-7: regiones de plegamiento (4: caledónicos, 5: hercínicos, 6: cretácicos (cimmericos), 7: alpinos), 8-9: macizos medianos en regiones de plegamiento, 10: plataformas epipaleozoicas con cubierta sedimentaria, 11: fronteras de cinturones neotectónicos y rifts, 12: grabens, 13: yacimientos de amazonita, 14-AM (amazonita mexicana). Modificada de Ostrooumov *et al.* (2008).

Caracterización breve de la amazonita mexicana

Por lo que se refiere a México, en la literatura existe sólo una referencia general y sin la precisión y descripción alguna sobre la posible presencia de la amazonita en dos estados: una en el estado de Chihuahua y otra en el estado de Oaxaca (Schmitter y Martín Del Campo, 1980). Más tarde, en el trabajo arqueológico se ha aparecido la información sobre la amazonita en la máscara de Malinaltepec (Guerrero) con una indicación que en el territorio mexicano se ha localizado un hallazgo de amazonita en el estado de Chihuahua (Sánchez-Hernández *et al.*, 2002). En este trabajo no se menciona ni la fuente de información, ni las personas concretas que están relacionadas con este hallazgo. Además, cabe mencionar que hasta ahora en la literatura no se encuentra ningún trabajo sobre la amazonita mexicana con su caracterización mineralógica y cristalquímica detallada. Por eso, el hecho de que se ha confirmado la presencia del feldespato amazonítico en el estado de Chihuahua ha provocado el gran interés de los mineralogistas y gemólogos.

El citado depósito se localiza en la parte norte de la República Mexicana, en el sitio conocido como Cerros Bahues (Figura 3a), que se encuentra aproximadamente a 8 km al SE de la población El Oriente Iturralde y a 12 km al NE de la cabecera municipal José Esteban Coronado, Mpio. Coronado, Chihuahua (coordenadas de localización de la concesión minera "Amazonita": 26°46'54"N; 105°03'24"W). El contexto geológico regional está conformado hacia la base por el complejo metamórfico sierra de Bahues constituido por gneiss granulíticos, anfibolitas y hornblenditas, en contacto discordante se tiene caliza y lutita de la Formación Mezcalera del Aptiano-Albiano y subyaciendo se tiene caliza de la Formación Aurora y Cuesta del Cura, cubriendo a la caliza se tienen coladas de basalto y relleno de las partes bajas con limo, arena y conglomerado polimictico. Las unidades calcáreas se encuentran afectadas por granitoides de composición subalcalina y granodiorítica, originando una aureola de metazomatismo representada por pegmatitas, skarn y hornfels (Pierre *et al.*, 2000).

El afloramiento que contiene a este feldespato potásico es un complejo granítico del Eoceno con escasos cristales de amazonita azul, que incluye también en su periferia, las vetas de pegmatitas del Oligoceno, enriquecidas en esta variedad mineral de color azul-verde. Por lo tanto, el feldespato amazonítico en este depósito muestra principalmente dos colores (azul y azul-verde), lo que ha permitido distinguirlos como dos generaciones diferentes (Figura 3b). Tomando en cuenta que los granitos son las formaciones genéticas, como regla, más antiguas que las pegmatitas asociadas, podemos suponer que la primera generación de color azul en los granitos es más antigua que la segunda de color azul-verde la cual se ha formado en las pegmatitas. La asociación mineralógica de los minerales principales componentes de la roca (amazonita+albita+cuarzo+mica), que se ha observado durante el trabajo de campo en este intrusivo granítico, es característica de los granitos subalcalinos con

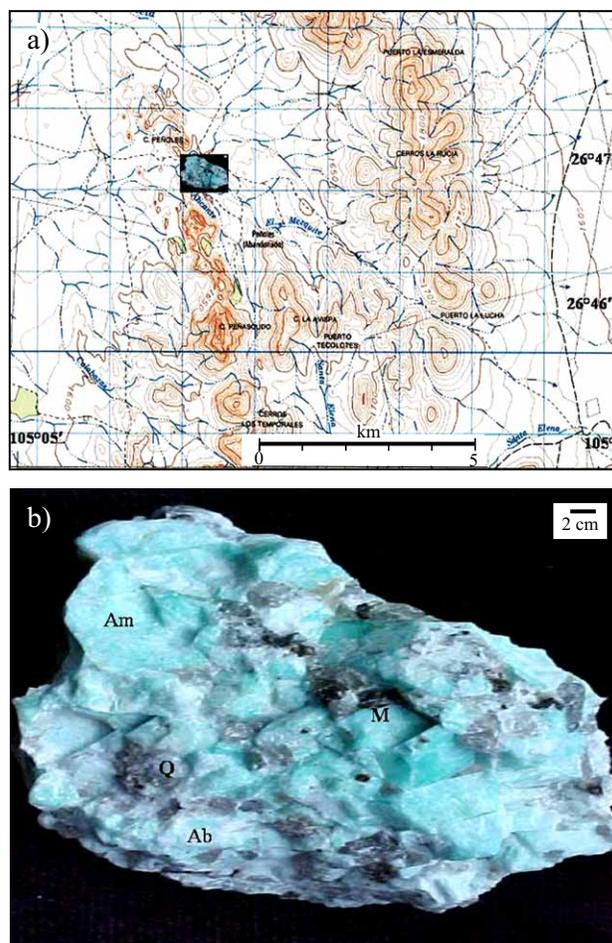


Figura 3. Localización del complejo granítico de composición subalcalina a) en el recorte de la carta topográfica (Pueblito de Allende, Chihuahua G13A59 esq. 1:50000, INEGI, 1994) y b) la amazonita azul en asociación con otros minerales principales componentes de la roca (Am-amazonita; Ab-albita; Q-cuarzo; M-mica. Cerros Bahues, Municipio Coronado).

los cuales, de acuerdo con la descripción geo-mineralógica de los complejos de granitoides, están vinculadas las formaciones de amazonita.

TÉCNICAS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Con el objetivo de determinar las principales características mineralógicas y geoquímicas de los cristales de amazonitas estudiados se utilizaron las siguientes técnicas analíticas:

a) Análisis químico por fluorescencia de rayos X (Espectrómetro marca Bruker SRS3000 usando 35 estándares internacionales para las curvas de calibración);

b) Difracción de rayos X (difractómetro Siemens D 5000, con radiación monocromática de Cu K α , $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, operado a 30 kV y 25 mA, con un tiempo de conteo de 0.6 s por punto y un paso angular de 0.02 grados 2 θ);

c) Espectroscopía infrarroja de reflexión (espectrometro Bruker Tensor-28-FTIR);

Tabla 2. Análisis químico de diferentes generaciones de amazonita en pegmatitas precámbricas (Península de Kola, Rusia) y los resultados del mismo de la amazonita mexicana (en % en peso y ppm determinados por FRX).

Elementos mayores y traza	Pegmatita precámbrica			Complejo granítico Terciario (Chihuahua, México)	
	Periférica con textura pegmatítica I generación (azul)	Intermedia con textura de bloques pequeños II generación (azul verde)	Central con textura de bloques grandes III generación (verde)	I generación en granitos (azul)	II generación en pegmatitas (azul -verde)
	SiO ₂	66.20	65.53	64.44	66.10
Al ₂ O ₃	18.90	18.80	18.60	18.70	17.60
Fe ₂ O ₃	0.07	0.06	0.04	0.03	0.022
K ₂ O	10.80	13.50	14.60	11.10	13.30
Na ₂ O	3.80	2.56	1.53	3.80	2.07
Rb ₂ O	0.23	0.34	0.69	1.04	1.81
Cs ₂ O	0.022	0.036	0.058	0.03	0.04
H ₂ O	0.009	0.012	0.034	0.01	0.02
PbO	0.09	0.12	0.79	0.01	0.03
U ¹	4	12	23	17	47
Th	8	32	67	10	30
Ba	200	115	17	205	100
Sr	30	124	210	125	11
Parámetros					
Colorimétricos					
λ, nm	491	500	522	495	503
P%	22	17	17	10	12
Y%	33.1	29.4	27.1	34.7	35.3

¹ - ppm; P%: pureza; Y%: claridad del color.

d) Espectroscopía de absorción UV-VIS-NIR (ultravioleta-visible-infrarroja cercana): los espectros fueron obtenidos con un espectrómetro UV-VIS-NIR LAMBDA 900 (Perkin-Elmer), y luego fueron recalculados por los parámetros colorimétricos correspondientes – longitud de onda (λ , nm), pureza (P%) y claridad (Y%) del color en el Sistema Internacional Colorimétrico XYZ. Estos parámetros permiten obtener información cuantitativa sobre la coloración de los cristales minerales (Ostrooumov, 2009);

e) Obtención de imágenes y análisis químicos cualitativos puntuales en un microscopio electrónico de barrido (MEB, modelo JSM 64000, marca JEOL, operado a 35 kV, con microanálisis por espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) modelo XFLASH-4010, marca Bruker).

Todos los equipos analíticos que se utilizaron en esta investigación se ubican en el Instituto de Materiales Jean Rouxel de la Universidad de Nantes, Francia.

RESULTADOS

Fluorescencia de rayos X

Ante todo, sería importante subrayar que los granitos que contienen la amazonita de Chihuahua muestran concentraciones altas de algunos elementos como el rubidio (950 ppm), litio (157 ppm), niobio (46 ppm), itrio (223

ppm), zirconio (83 ppm) y flúor (1850 ppm). Comparando estos resultados con otros complejos de granitoides (Tabla 1), podemos concluir que los granitos con amazonita de Chihuahua presentan una afinidad subalcalina.

El análisis de los datos bibliográficos y los resultados de nuestras propias investigaciones sobre la composición química de amazonitas, encajonadas en diferentes tipos de rocas graníticas (Ostrooumov *et al.*, 2008), permiten establecer las diferencias entre la amazonita y los feldespatos potásicos de colores ordinarios (no amazonita). La amazonita, en comparación con los feldespatos potásicos ordinarios, presenta concentraciones más elevadas de plomo y elementos traza radioactivos como rubidio, uranio y torio.

Cabe mencionar que, de acuerdo con los datos obtenidos, se encontró que existe la misma tendencia en la evolución de la composición química en diferentes generaciones de la amazonita lo que muestran, por ejemplo, los resultados de su estudio cristalquímico en diferentes zonas de la veta pegmatítica en la Península de Kolski (Tabla 2). Así, la transición de la amazonita de primera generación (ubicada en zona periférica de color azul) hacia la amazonita tardía (cristalizada en zona central de color verde), está acompañada por un enriquecimiento en el componente potásico (ortosa), y en plomo, elementos alcalinos raros, componentes volátiles y por un empobrecimiento en hierro, bario, estroncio y el componente sódico (albita).

Los análisis químicos de la amazonita mexicana de edad terciaria también muestran altas concentraciones en

algunos elementos traza (rubidio, plomo, uranio, y torio), y un empobrecimiento en hierro, bario y estroncio y en el componente sódico, en comparación con feldespatos ordinarios. Además, se observa la misma tendencia en la evolución de la composición química de las amazonitas de las dos generaciones existentes (Tabla 2). Comparando estos resultados con los datos publicados en la literatura (Ostrooumov *et al.*, 2008), se puede decir que las amazonitas estudiadas, por su composición química, son muy parecidas a las amazonitas mesozoicas de Transbaikal, Siberia (Rusia).

Los resultados del recalcu del análisis químico de la amazonita han permitido mostrar las fórmulas cristaloquímicas de sus diferentes generaciones que se formaron en los granitos y pegmatitas terciarias de México:

(K_{2.57} Na_{1.34} Rb_{0.12} Pb_{0.001}) (Al_{4.02} Si_{12.04} Fe_{0.004}) O₃₂ - (I generación, azul);

(K_{3.15} Na_{0.73} Rb_{0.22} Pb_{0.002}) (Al_{3.88} Si_{12.02} Fe_{0.002}) O₃₂ - (II generación, azul verde).

Estos datos muestran claramente que la composición química de la amazonita se distingue en diferentes generaciones las cuales se formaron en los granitos y pegmatitas asociadas.

Difracción de rayos X y espectroscopía infrarroja

Los resultados que arrojan los difractogramas de los granitos y pegmatitas de Chihuahua indican que los minerales esenciales de las muestras analizadas son: feldespatos de diferentes naturaleza (microclina y plagioclasa de composición ácida = albita), cuarzo y una mica rica en F-Li – zinnwaldita (Tabla 3). Además, los datos difractométricos muestran la presencia muy escasa de un óxido de niobio y tántalo (manganocolumbita).

El estado estructural de feldespatos alcalinos (microclina-ortosa-sanidina) se puede analizar mediante el estudio de los parámetros de celda unidad, obtenidos a partir de los difractogramas de rayos X, o mediante el estudio de la posición de los picos que permanecen simples (h0l, h00, 0k0 y 00l) y de aquellos que se desdoblán (hkl, hk0 y 0kl) cuando cambia la simetría de monoclinico a triclínico. Estos efectos de desplazamientos y desdoblamientos han sido utilizados para definir distintos parámetros relacionados con el orden local Si/Al (Altaner y Kamentsev, 1995).

El desdoblamiento de los picos (131) y ($\bar{1}\bar{3}1$) o triclínicidad Δ puede ser usado para estimar el ordenamiento Si/Al que provoca el aumento del carácter triclínico por desviación progresiva de los 90° de la simetría monoclinica. Para $\Delta = 0$ entonces $\alpha = \gamma = 90^\circ$, mientras que para $\Delta = 1$ la distorsión triclínica es máxima, como ocurre en la microclina ordenada.

Los resultados obtenidos de los difractogramas indican que todas las amazonitas se caracterizan por el alto grado de ordenamiento Al/Si (triclínicidad $\Delta > 0.90$). Por otra parte, la amazonita de la segunda generación (azul verde) pertenece a una variedad más ordenada ($\Delta = 1.00$) en comparación

Tabla 3. Datos de difracción de rayos X de los granitos con amazonita.

Muestra de granito	Mc	Ab	Q	Zinn	MnCol
Distancias interplanares en Å					
9.825				9.82	
7.217					7.21
6.401		6.39			
4.253			4.25		
4.225	4.22				
4.030		4.03			
3.833	3.83				
3.785		3.78			
3.703	3.70				
3.682		3.68			3.69
3.658		3.66			
3.615					3.60
3.375	3.37				
3.342			3.33	3.34	
3.293	3.29			3.29	
3.257	3.26				
3.248	3.25				
3.237	3.24				
3.203		3.196			
3.090				3.085	
2.990					2.98
2.930		2.933			
2.893				2.89	
2.595				2.59	
2.455			2.45		
2.410					2.40
2.278			2.28		
1.978				1.98	
1.820			1.817		
1.740					1.734
1.540			1.541		
1.480					1.477
1.370			1.372		
1.333			1.331		

D.i.: Mc: microclina; Ab:albita; Q:cuarzo; Zinn: zinnwaldita; MnCol: manganocolumbita.

con la amazonita azul de la primera generación ($\Delta = 0.93$).

Los espectros infrarrojos de reflexión se han obtenido también con el fin de evaluar el grado de ordenamiento Al/Si en la estructura de la amazonita estudiada. Recientemente se han evaluado los espectros infrarrojos de reflexión de los feldespatos alcalinos en función de un grado del orden/desorden estructural de los átomos de Al/Si en la estructura cristalina (Ostrooumov, 2007). El resultado de estas investigaciones ha mostrado que la interpretación detallada de los espectros infrarrojos de reflexión de los feldespatos alcalinos permite obtener una evaluación precisa de sus particularidades estructurales. En el espectro infrarrojo de los feldespatos alcalinos se observa un cambio claro entre las intensidades de dos bandas de reflexión (que están relacionadas con modos vibracionales de Si-O-Al) las cuales se encuentran en el intervalo 700-800 cm⁻¹. Esta relación se expone en la disminución de la relación I_{730}/I_{770} (Figura 4) dentro de una serie – la sanidina desordenada ($I_{730}/I_{770} > 4$) – la microclina ordenada ($I_{730}/I_{770} < 1$) – que se

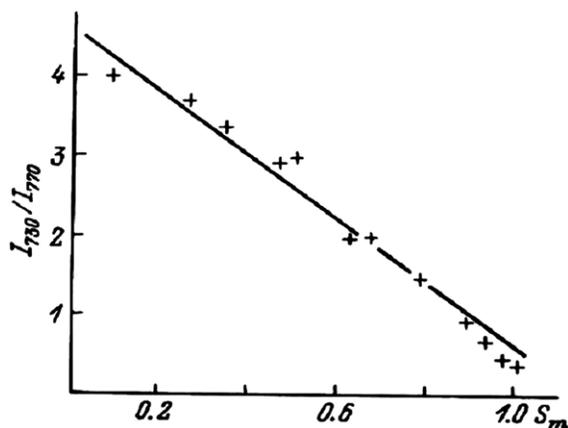


Figura 4. Correlación entre el valor espectrométrico (I_{730}/I_{770}) y el grado de desorden Al/Si estructural (S_m) en los feldespatos alcalinos: sanidina desordenada-microclina ordenada. Tomada de Ostrooumov (1991a).

caracterizan por diferente grado del desorden estructural o por el valor del grado de desorden monoclinico (S_m). El valor de esta relación I_{730}/I_{770} es <1 para la amazonita mexicana lo que confirma que esta variedad feldespática pertenece a la microclina ordenada.

Espectroscopía UV-VIS-NIR y colorimetría

Los espectros de la amazonita analizada en la región UV-VIS-NIR muestran por lo menos dos bandas de absorción. Primeramente, se observa la absorción intensa en la región UV cercana con el máximo característico alrededor de 380 nm. Según los datos bibliográficos (Ostrooumov *et al.*, 2008), la absorción en esta zona está relacionada con el centro de color hueco Al-O⁻-Al y el centro de color Fe³⁺. Otra banda intensa de absorción, la que principalmente determina el color de la amazonita, se encuentra en la región visible (el máximo aparentemente se mueve en el intervalo de 625-740 nm lo que provoca los diversos matices de color en esta variedad feldespática). La presencia de esta banda, de acuerdo con los datos bibliográficos (Ostrooumov y Banerjee, 2005), está relacionada con dos centros de color de Pb: el centro electrónico Pb⁺ y el hueco O⁻-Pb. Por lo tanto, los espectros obtenidos muestran la misma naturaleza del color de la amazonita mexicana como ocurre en otros yacimientos estudiados.

Los espectros de la amazonita en la región visible permiten calcular sus parámetros colorimétricos. Desde este punto de vista se han investigado las amazonitas de diferentes yacimientos graníticos y pegmatíticos. De acuerdo con los resultados obtenidos, los parámetros colorimétricos de este mineral varían en los límites bastante amplios: λ (longitud de onda) = 491–570 nm, P (pureza) = 5–25%, Y (claridad) = 25–70%. La pureza más alta es característica para las amazonitas de las pegmatitas precámbricas (Península de Kola, Rusia). Al contrario, este parámetro es el mínimo para los granitos de una edad cretácica (Kazajstán,

Transbaikal). Las mismas muestras tienen las correlaciones inversas por los valores de la claridad del color. El análisis de los parámetros colorimétricos permite concluir que en las formaciones geológicamente más jóvenes y de menor profundidad las amazonitas se caracterizan por los valores menores de la pureza y por el intervalo más amplio de los valores de la longitud de onda (Figura 5). Los parámetros colorimétricos de la amazonita mexicana ($\lambda=495\text{--}503$ nm, P=10–12%, Y=34.7–35.3%) son muy cercanos a las reportadas para amazonitas que se formaron en granitos mesozoicos subalcalinos (F-Li) de Transbaikal, Rusia: $\lambda=495\text{--}510$ nm, P=10–15%, Y=30–50% (Ostrooumov *et al.*, 2008).

Microscopía electrónica de barrido.

Los análisis por EDS han corroborado la presencia de los principales minerales componentes de los granitos y pegmatitas terciarias (amazonita, albita, cuarzo y zinnwaldita) que anteriormente se habían encontrado mediante difracción de rayos X. Es muy importante hacer notar que los análisis químicos realizados con la ayuda de esta técnica muestran las mismas tendencias en el cambio de concentraciones de los elementos mayores y traza para las muestras de diferentes generaciones de la amazonita. Así, las generaciones tardías se caracterizan por las máximas concentraciones traza características (rubidio, plomo, uranio, y torio).

Además, con la ayuda de la microscopía electrónica de barrido hemos confirmado en las muestras estudiadas, la presencia de una fase mineral que se ha identificado como manganocolumbita (Mn, Fe)(Nb, Ta)₂O₆, (uno de los minerales económicos más importantes de los granitos con amazonita) reportada por primera vez en los yacimientos de México en general (Figura 6 a,b). Por lo tanto, la utilización de MEB ha complementado la información ya obtenida por otras técnicas analíticas y, además, ha permitido establecer

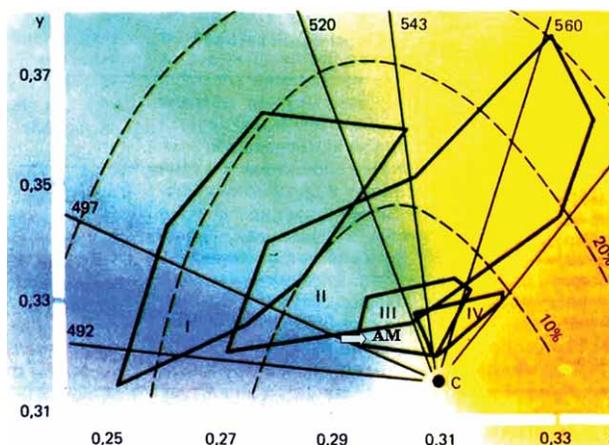


Figura 5. Gráfico colorimétrico de las amazonitas: pegmatitas de la Península de Kola (I) y de Urales (II); granitos de Transbaikal (III) y Kazajstán (IV). AM-amazonita mexicana. Modificada de Ostrooumov (1987).

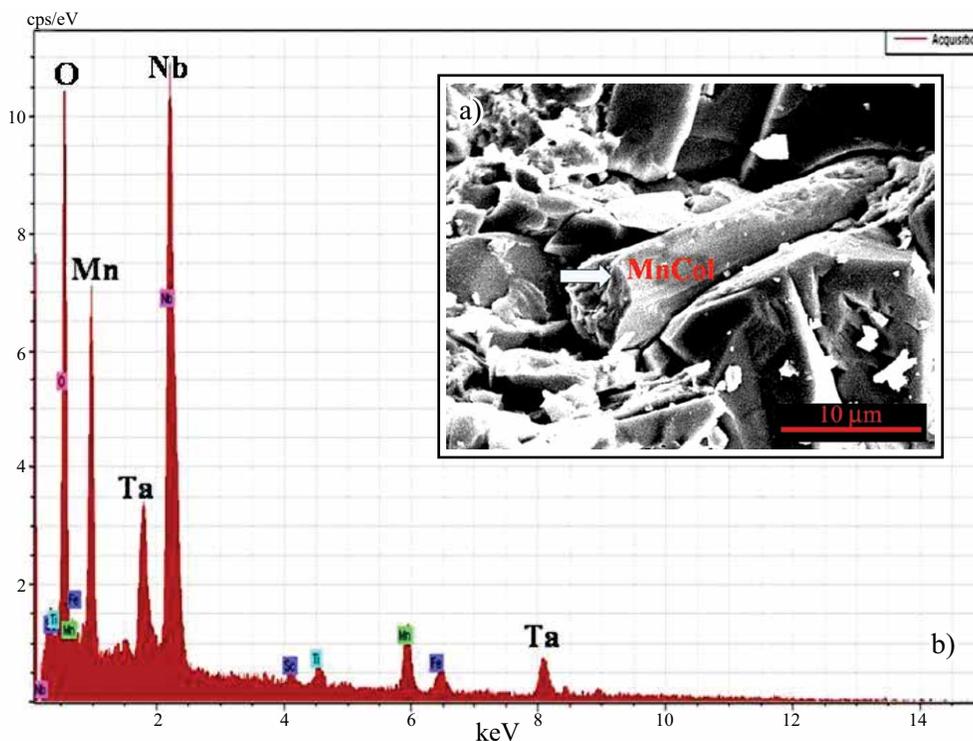


Figura 6. Fotomicrografía de MEB (a) y determinación de componentes (espectro EDS) (b) en un cristal de manganocolumbita $(\text{Mn, Fe})(\text{Nb, Ta})_2\text{O}_6$, procedente del yacimiento de amazonita de Cerros Bahues, Municipio Coronado, Chihuahua.

la presencia de una fase mineral nueva que se ha formado en las pegmatitas con la amazonita.

DISCUSIÓN

Es importante mencionar que los cristales de amazonita formados en diferentes condiciones petrológicas y geoquímicas se diferencian por algunas particularidades de su composición química (aquí llamados atributos tipomórficos). Así, por ejemplo, la composición de las amazonitas de las pegmatitas precámbricas (Península de Kola, Rusia) muestra un amplio rango de variación tanto para los elementos mayores como para algunos traza (Tabla 2). En este caso concreto, el contenido de K_2O en las amazonitas del cuerpo pegmatítico Ploskaya (Península de Kola, Rusia) varía de 10.8 a 14.6 %, mientras que la concentración de Na_2O varía de 1.53 a 4.2% lo que corresponde a 63–87% de Ortosa y 13–38% de Albita. Las amazonitas precámbricas contienen las concentraciones máximas de plomo (en las generaciones tardías hasta 1.0-1.2% de PbO). Las concentraciones promedio de U (12.5 ppm) y Th (27.2 ppm) superan considerablemente el promedio de estos elementos en microclinas ordinarias de otros tipos de pegmatitas (Ostrooumov *et al.*, 2008). En este caso se trata de diferentes niveles de concentración de los elementos traza característicos. A diferencia de las amazonitas precámbricas, las de las pegmatitas paleozoicas (Urales) o de los granitos

mesozoicos (Transbaikal), se caracterizan por otras particularidades geoquímicas lo que se observa por otros niveles de concentración de trazas características (Tablas 4 y 5). Se puede constatar que las amazonitas paleozoicas contienen concentraciones máximas de rubidio, mientras que en las mesozoicas se determinan cantidades mínimas de plomo.

En el resultado de las investigaciones mineralógicas y geoquímicas fueron establecidas las características específicas (paragénesis, cristalquímica y color) de las amazonitas que se formaron en los granitos y pegmatitas terciarias de Chihuahua, México. Así, por ejemplo, la máxima concentración de Rb (1.80 % Rb_2O) y la mínima de Pb (30 ppm), U (5 ppm), y Th (3 ppm) son los índices geoquímicos de las amazonitas terciarias en comparación con las amazonitas precámbricas y paleozoicas (Tabla 5).

Las investigaciones cristalquímicas y espectroscópicas han establecido los atributos tipomórficos (composición química, estructura cristalina, color, etc.) de las amazonitas para diferentes condiciones de mineralogénesis (Ostrooumov *et al.*, 2008). Así, por ejemplo, las amazonitas terciarias (del N de México), muestran bajos contenidos en plomo y altos contenidos en rubidio, el alto grado de orden estructural (microclina ordenada) y los parámetros colorométricos característicos ($\lambda=495\text{--}503$ nm, $P=10\text{--}12\%$, $Y=34.7\text{--}35.3\%$).

Por lo tanto, en la descripción sistemática de la amazonita, los atributos tipomórficos juegan un papel importante, ya que expresan un cambio en la composición química (Tabla 3), en las particularidades de la estructura cristalina,

Tabla 4. Composición química de las amazonitas en los yacimientos de Rusia: pegmatitas precámbricas (Península de Kola y Karelia), pegmatitas paleozoicas (Urales) y granitos mesozoicos (Transbaikal).

Localidad, yacimiento	Zona textural de la pegmatita, número de muestra	Color	λ nm	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Rb ₂ O	PbO
Península de Kola, Montaña veta Ploskaya, 20	Pegmatoides, 355	Rosa	596	65.90	19.54	0.19	11.10	3.00	0.10	0.0004
	345	Azul-rosada	500	66.10	19.10	0.24	11.70	3.20	0.16	0.02
	345	Azul	497	65.53	18.80	0.08	13.20	2.56	0.27	0.05
Karelia, Pirtima, veta 1	de bloques: 172	Crema	590	64.40	18.65	0.08	13.14	3.05	0.07	0.01
	163	Verde pálido	568	65.43	18.6	0.08	13.8	2.32	0.20	0.02
	164	Verde intenso	544	63.8	19.0	0.08	14.57	1.70	0.36	0.03
Montañas Urales, Ilmen, veta 70	de bloques pequeños, 70-84-1	Amarillo	593	65.9	18.8	0.09	10.15	4.56	0.087	0.007
	de bloques grandes, 70-84-3	Amarillo-verdoso	569	66.1	18.9	0.07	10.75	3.32	0.29	0.03
	veta, 77	Pegmatítica, 77a	Gris-rosado	587	64.6	18.7	0.09	11.75	4.87	0.11
Transbaikal, Granitos, Orlovka, veta 1	de bloques pequeños, 77-2	Verde-pálido	570	65.7	19.1	0.06	10.5	4.62	0.14	0.03
	de bloques grandes, 77-3	Verde	548	65.4	19.15	0.04	13.62	1.82	0.70	0.04
	de granos pequeños, 501	Azul	500	63.80	18.65	0.08	14.57	1.70	1.00	0.005
Pegmatitas, veta 2	de bloques pequeños, 505	Azul-verde	520	64.90	18.20	0.03	14.9	1.25	1.30	0.035

λ : longitud de onda en el sistema colorimétrico X,Y,Z

y en el color, es decir, en el conjunto de las particularidades específicas de su cristalografía y diversas propiedades. En otras palabras, los índices tipomorfos de la amazonita son, en primer lugar, sus particularidades geoquímicas y estructurales. En segundo lugar, entre estos atributos también se encuentran diferentes propiedades físicas de la amazonita (por ejemplo, el color) que a su vez dependen de unas particularidades cristalográficas específicas y por lo tanto, de las condiciones concretas de formación y transformación de este feldespato alcalino en diversos ambientes geológicos.

En suma, los estudios cristalográficos y colorimétricos, así como también la asociación de la amazonita mexicana con una mineralización de niobio y tántalo, permiten mostrar que la cristalografía y las propiedades de esta variedad mineral de los feldespatos alcalinos, así como también su paragénesis, son muy parecidas a las mismas características de las amazonitas de Transbaikal, Siberia (Rusia) las cuales se formaron en los macizos granitoides subalcalinos con los minerales importantes de los elementos raros (Ta, Nb y Sn).

Estos hechos muestran, ante todo, el alto potencial del subsuelo mexicano con relación a la búsqueda de nuevas materias primas, así como también la clara posibilidad de encontrar nuevos tipos de yacimientos minerales que podrían ser detectados en un futuro. Para el caso concreto del primer hallazgo de la amazonita mexicana, sería conve-

niente realizar un estudio mineralógico y geoquímico más completo en diversas zonas de los granitos y pegmatitas en las cuales se ha encontrado esta variedad feldespática.

Por lo tanto, vale la pena destacar la posibilidad de utilizar la amazonita como mineral índice de búsqueda y prospección para algunos tipos de yacimientos minerales con contenidos de metales y tierras raras (Ta, Nb, Sn). Las contradicciones en la evaluación de esta posibilidad radican en la falta de un estudio detallado de la posición petrológica y geoquímica de la amazonita, comprensión que serviría de clave para resolver correctamente este problema práctico. Sería conveniente mencionar en este espacio que de acuerdo con los datos recientes de Ercit (2005), en las 1500 apariciones globales de las pegmatitas graníticas, aproximadamente 80% contienen las amazonitas en la asociación con metales económicos (Ta, Nb, Sn) y tierras raras.

La amazonita se ha considerado como un mineral con índices genéticos característicos, que indican su pertenencia a un proceso geológico bien definido, a una u otra etapa del proceso, o a una asociación paragenética bajo una temperatura determinada de formación. De acuerdo con la interpretación genética que ha sido propuesta recientemente (Ostrooumov *et al.*, 2008), la amazonita, como regla general, aparece en las fases finales de formación de los diferentes tipos genéticos de rocas granitoides y, por lo tanto, representa el índice más claro de la manifestación de procesos geoló-

Tabla 5. Características tipoquímicas de las amazonitas en pegmatitas (1 - Precámbricas, Península de Kola; 2- Paleozoicas, Urales) y en granitos (3-Mesozoicos, Transbaikal; 4-Terciarios, Chihuahua, México).

Composición química en ppm	1	2	3	4
Pb Plomo	3410 300–11000	460 50–1100	160 60–250	163 82–244
Rb Rubidio	3400 1100–6300	7730 1200–22000	7100 1410–18000	6862 1750–12014
Th Torio	27 8–61	13 3–21	3 2–4	4 3–5

gicos posteriores a su formación (greisenización, albitización y concentración de metales raros), que fueron superpuestos en diversos tipos de yacimientos minerales y que, a su vez, están relacionados con alguna mineralización de importancia económica. Por esta razón, se puede estimar que, los yacimientos de amazonita delimitan las áreas de influencia de los complejos granitoides potencialmente susceptibles de contener mineralización y pueden servir como guía para la prospección de diversos yacimientos minerales económicos.

CONCLUSIONES

Los cristales de diferentes generaciones de la amazonita de los granitos y pegmatitas de Chihuahua, México se caracterizan por los siguientes atributos tipomórficos: (1) se observa la evolución química de la amazonita de los granitos a las pegmatitas por el aumento de las concentraciones de K_2O , Rb_2O , Cs_2O , PbO , Sr , U y Th y la disminución de la concentración de Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3 y Ba ; (2) las amazonitas se caracterizan por el alto grado de orden estructural Al/Si . Todos los parámetros obtenidos por la difracción de rayos X y la espectroscopía infrarroja de reflexión muestran que la amazonita pertenece a la microclina ordenada; (3) Sólo en este tipo estructural son estables los centros paramagnéticos electrónicos o huecos de Pb de color característico. Estos centros no se encuentran en los feldespatos de otra naturaleza química o estructural, provocan el color azul-verde en los feldespatos alcalinos y determinan los parámetros colorimétricos característicos; (4) los atributos tipomórficos y de coloración de la amazonita mexicana son muy parecidos a los de las amazonitas en granitoides subalcalinos del Transbaikal, Siberia (Rusia).

Tomando en cuenta el conjunto de los resultados obtenidos en los primeros estudios mineralógicos y geoquímicos de la amazonita recientemente descubierta en Chihuahua, México, habrá que realizar en el futuro su análisis petroológico detallado con el fin de entender su significado más concreto: una guía de prospección de yacimientos con los minerales de importancia o bien un hallazgo particular que

podría ser interesante sólo desde el punto de vista mineralógico y gemológico.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su sincero agradecimiento a Dr. Carles Canet Miquel, Dr. Francisco Abraham Paz Moreno y a un árbitro anónimo por sus valiosos y constructivos comentarios sobre el trabajo y por sus recomendaciones que fueron tomadas en cuenta por el autor lo que ha permitido finalmente mejorar la comprensión de los resultados presentados.

REFERENCIAS

- Altaner, S., Kamentsev, I., 1995, X-ray diffraction techniques for the characterization of minerals, *en* Marfunin A., (ed.), *Advanced mineralogy*, vol.2, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 32-38.
- Barker, F., Wones, D.R., Sharp, W.N., Desborough, G.A., 1975, The Pikes Peak batholith, Colorado Front Range, and a model for the origin of the gabbroanorthosite-syenite-potassic granite suite: *Precambrian Research*, 2, 97–160.
- Belousov, V., 1975, Problemas fundamentales de geotectónica (en ruso): Moscú, Nedra, 608 pp.
- Beskin, M., 1979, Formaciones de granitoides de los yacimientos de metales raros (en ruso): Moscú, Nedra, 247 pp.
- Brito-Barreto, S., Bretas-Bittar, S.M., 2010, The gemstone deposits of Brazil: occurrences, production and economic impact: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 1, 123-140.
- Cassedanne, J.P., 1994, L'amazonite de Santa Maria de Itabira (Minas Gerais-Bresil): *Revue de Gemmologie (AFG)*, 120, 8-9.
- De Vito, C., Pezzotta, F., Ferrini, V., Aurisicchio, C., 2006, Nb-Ti-Ta oxides in the gem-mineralized and "hybrid" Anjanabonoina granitic pegmatite, central Madagascar: A record of magmatic and postmagmatic events: *The Canadian Mineralogist*, 44, 87–103.
- Ercit, T.S., 2005, REE-enriched granitic pegmatites, *en* Linnen, R.L., Samson, M.L. (eds.), *Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits*, Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes 17, 175-199.
- Feldman, L., Beus A., Kovalenko A., 1967, Amazonitización de granitoides en relación con la formación de depositos (en ruso): Moscú, Nedra, 103 pp.
- Foord, E.E., Martin, R.F., 1979, Amazonite from the Pikes Peak batholith: *The Mineralogical Record*, 10, 373-384.
- Hofmeister, A.M., Rossman, G.R., 1985, A spectroscopic study of irradiation coloring of amazonite: structurally hydrous, Pb-bearing feldspar. *American Mineralogist*, 70, 794-800.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1994, Mapa topográfico Pueblito de Allende, Chihuahua G13A59, esc. 1:50000.
- Julg, A., 1998, A theoretical study of the absorption spectra of Pb^{2+} and Pb^{3+} in site K^+ of microcline: application of the color of amazonite: *Physics and Chemistry of Minerals*, DOI: 10.1007/s002690050108 25 (3), 229-233.
- Kovalenko, V., Kuzmin, M., Nagibin, M., 1971, Granitoides de Mongolia (en ruso): Moscow, Nauka, 185 pp.
- Marfunin, A., Bershov, L., 1970, Paramagnetic centers in feldspars and their possible crystalchemical and petrological significance: *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 193, 412-414 (*Doklady Akademi Nauk Translations*, 193, 129-130).
- Martin, R.F., De Vito, K., Pezzotta, F., 2008, Why is amazonitic K-feldspar an earmark of NYF-type granitic pegmatites? Clues from hybrid pegmatites in Madagascar: *American Mineralogist*, 93, 263-269.

- Ostrooumov, M., 1982, Amazonita (en ruso): *Nature*, 3, 45-43.
- Ostrooumov, M. 1987. Colorimetry of the minerals (en ruso): *Nature*, 6, 43-53.
- Ostrooumov, M. 1991, L'amazonite: *Revue de Gemmologie (AFG)*, 108, 8-12.
- Ostrooumov, M., 1991a. Method of determination of the lattice ordering degree in the alkaline feldspars by infrared reflection spectrometry (en ruso): *Proceedings of the USSR Mineralogical Society*, 5, 94-99.
- Ostrooumov, M., 2007, Espectrometría infrarroja de reflexión en Mineralogía Avanzada, Gemología y Arqueometría: Monografías del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 87 pp.
- Ostrooumov, M., 2009, Mineralogía Analítica Avanzada: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-Sociedad Mexicana de Mineralogía, ISBN 978-607-424-095-5, 275 pp.
- Ostrooumov, M., Banerjee A., 2005, Amazonite from Pre-Cambrian pegmatites (Kola Peninsula, Russia): crystal chemical and spectrometric study: *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 85, 89-102.
- Ostrooumov, M., Robles-Camacho, J., 2007, First discovery of amazonite in Mexico: *Gems and Gemology*, 43, 163-164.
- Ostrooumov, M., Platonov, A., Popov, A., 2008, Amazonstone: mineralogy, crystal chemistry and typomorphism (en ruso): *St. Petersburg, Ed. Polytechnics*, 255 pp.
- Petrov, I., Mineeva, R., Bershov, L. Agel, A., 1993, EPR of [Pn-Pb] mixed valence pairs in amazonite-type microcline: *American Mineralogist*, 78 (5-6), 500-510.
- Pierre, P.J., Herrera, G.J., De los Santos, M.J., Sánchez, G., E., Arroyo, O.E., Tarín, Z.J., 2000, Cartografía Geológico Minera, Carta Hidalgo del Parral G13-5, esc.1:250000, Consejo de Recursos Minerales, México.
- Sánchez-Hernández, R., Robles-Camacho, J., Reyes Salas, M., 2002, Uso alternativo de amazonita y turquesa en objetos arqueológicos: *GEOS*, 22, 2, 287-288.
- Schmitter, V. E, Martín Del Campo, R., 1980, Glosario de especies minerales: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Smirnov, V., 1976, Geología de yacimientos minerales: Moscú, MIR, 654 pp.
- Szuzkiewicz, A. Körber, T., 2010, "Amazonit" oder "Gruner Microcline"? Zur Ursache der Grünfärbung von Kalifeldspäten aus dem Striegauer Granit: *Lapis*, 35 (7-8), 75-77; 86.
- Vinogradov, A., 1962, Concentración de elementos químicos en diferentes formaciones de granitoides (en ruso): *Geoquímica*, 7, 555-571.
- Voloshin, A., Pakhomovsky, Y., 1986, Evolución mineralógica en pegmatitas de Kola peninisula (en ruso): *Nauka, Leningrad*, 168 pp.

Manuscrito recibido: Junio 3, 2010

Manuscrito corregido recibido: Septiembre 10, 2011

Manuscrito aceptado: Septiembre 11, 2011