

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL URANÍFERO DEL VOLCANISMO JURÁSICO (COMPLEJOS BAHÍA LAURA Y EL QUEMADO), PROVINCIA DE SANTA CRUZ, MEDIANTE ESPECTROMETRÍA GAMMA TERRESTRE Y GEOQUÍMICA DE ROCAS

Laura E. KLEIMAN¹, Alejandro L. MALOBERTI¹, María Rosario GAYONE², Patricia SRUOGA³, María Silvia JAPAS³ y Cintia KAUFMANN²

¹ Gerencia de Exploración, Comisión Nacional de Energía Atómica. E-mail: kleiman@cnea.gov.ar

² Departamento Regional Patagonia, Comisión Nacional de Energía Atómica.

³ CONICET

RESUMEN

Los relevamientos radimétricos constituyen una herramienta rápida para medir concentraciones de uranio (U), torio (Th), y potasio (K) en las rocas y resultan muy útiles para la exploración de minerales radioactivos. En este trabajo, se evalúa la distribución del uranio en volcanitas jurásicas de la provincia de Santa Cruz, utilizando datos de espectrometría gamma terrestre y de geoquímica de rocas, con el objetivo de determinar su potencial para formar yacimientos. Se seleccionaron cinco zonas con antecedentes de valores radimétricos elevados e información geológica detallada. Las mediciones se realizaron con un espectrómetro de rayos gamma portátil (Exploranium-GR 320[®]) en andesitas, ignimbritas, riolitas, áreas silicificadas, tobas de caída y sedimentos lacustres de los complejos Bahía Laura y El Quemado. Los resultados obtenidos son similares en todas las zonas relevadas: los valores radimétricos muestran buenas correlaciones con los datos químicos de roca para el K y el Th y menores para el U. Los procesos de diferenciación magmática, cristalización en fase vapor, alteración hidrotermal y alteración supergénica se reflejan en la distribución de estos elementos. Los contenidos de U se incrementan en las rocas más vítreas, en zonas de silicificación hidrotermal y en zonas de fractura, características a considerar en futuros relevamientos. La naturaleza calcoalcalina con impronta de arco del magmatismo jurásico no es de las más favorables para el enriquecimiento de uranio y para contener importantes mineralizaciones. Sin embargo, el ambiente extensional, la presencia de calderas con facies levemente enriquecidas en uranio y torio así como la de actividad hidrotermal, son factores positivos para la exploración por uranio.

Palabras clave: *Exploración de U, Provincia Volcánica-Riolítica Chon Aike*

ABSTRACT

Assessment of the uranium potential of the Jurassic volcanism (Bahía Laura and El Quemado Complexes), Province of Santa Cruz, using ground-borne gamma-ray spectrometry and rock geochemistry.

Radiometric surveys are a rapid tool to measure uranium (U), thorium (Th) and potassium (K) concentrations in rocks and are very useful in the exploration for radioactive minerals. The distribution of uranium in Jurassic volcanic rocks of the province of Santa Cruz is evaluated in this work using ground gamma-ray spectrometry and rock geochemistry in order to assess its potential to form uranium deposits. Five areas were selected, which had some previous data of high radiometric values and detailed geological information. Measurements were carried out with a portable gamma-ray spectrometer (Exploranium-GR 320[®]) in andesites, ignimbrites, rhyolites, silicified areas, ash-fall tuffs and lacustrine sediments corresponding to the Bahía Laura and to El Quemado complexes. The results were similar in the five surveyed areas: radiometric concentrations show good positive correlations with chemical composition of the studied rocks for both K and Th, and a relatively poorer correlation for U. Different processes such as magmatic differentiation, vapor phase crystallization, hydrothermal alteration and supergene alteration are reflected in the distribution of these elements. U concentrations increase in the more glassy rocks, in areas with hydrothermal silicification, and in fracture zones, features that should be considered in future surveys. The calk-alkaline composition and arc-signatures of the Jurassic magmatism are not the most favorable for uranium enrichment and for concentration of significant mineralizations. However, the extensional tectonic setting; the occurrence of calderas with facies slightly enriched in U and Th, in addition to hydrothermal activity are positive factors for U exploration.

Keywords: *U exploration, Chon Aike Rhyolitic Volcanic Province*

INTRODUCCIÓN

Las rocas volcánicas silíceas constituyen una de las principales rocas fuente de uranio para una gran variedad de yacimientos, debido a la concentración de este elemento en los vidrios volcánicos y a la facilidad con la cual este elemento es lixiviado de los mismos (Zielinski 1981, 1985). Asimismo, existen numerosos ejemplos de yacimientos de uranio volcanogénicos, a nivel mundial, los cuales han sido revalorizados recientemente al conocerse importantes recursos provenientes de los mismos en países de la ex Unión Soviética (Nash 2010). En general están relacionados a ambientes continentales extensionales, en los cuales se desarrollan calderas (Cuney y Kyser 2008 y referencias allí citadas). Según estos autores, las mineralizaciones están controladas por estructuras dentro de las unidades volcánicas y el uranio se encuentra asociado a Mo, F, Th y elementos de tierras raras, entre otros elementos. Los tenores altos de U de algunos magmas silíceos están a su vez enriquecidos por la acción de soluciones hidrotermales (Cuney y Kyser 2008 y referencias allí citadas). Las volcanitas peralcalinas son las que mayormente concentran este elemento, aunque se han registrado altos tenores en riolitas alcalinas, en riolitas metaluminosas y en tobas calcoalcalinas (Castor y Henry 2000).

Por otra parte, en una revisión sobre la asociación del uranio con el volcanismo, Nash (2010) define como volcanogénicos a todos los depósitos que están espacialmente vinculados con este tipo de rocas sin asumir una relación genética. Sobre la base de la clasificación de Goodell (1985), Nash (2010) reconoce dos tipos de ambientes principales ligados a un centro volcánico en los cuales pueden alojarse mineralizaciones de uranio: proximales y distales. Los primeros incluyen las calderas, las facies de intracaldera, las fracturas que limitan la caldera y los cuerpos subvolcánicos, en tanto que los segundos se refieren a los flujos de extra-caldera, las tobas de caída y los sedimentos lacustres asociados. Un tercer ambiente lo constituyen las estructuras previas al volcanis-

mo, tales como fallas, fracturas y brechas que pueden alojar mineralizaciones generadas durante un evento volcánico superpuesto, incluyendo al hidrotermalismo póstumo.

En un análisis de nuevos ambientes geológicos factibles de contener mineralizaciones de uranio de acuerdo a la geología de nuestro país, Kleiman y Ramos (2005) consideraron a las provincias riolíticas de Choiyoi y de Chon Aike como áreas a investigar por modelos de uranio asociados a centros volcánicos silíceos. Por lo tanto, con el objetivo de evaluar el potencial uranífero del volcanismo jurásico (provincia riolítica Chon Aike), de la provincia de Santa Cruz, se decidió tomar un enfoque integral considerando la información sobre las facies volcánicas, la estructura, la geoquímica de las rocas y la espectrometría gamma. Dada la extensión del volcanismo jurásico, en este estudio se seleccionaron tres zonas en el Macizo del Deseado y dos en la Cordillera Patagónica. Esta selección se basó en la existencia de una abundante información previa, procedente principalmente de los estudios llevados a cabo por el INREMI (UNLP-CONICET) y por el Servicio Geológico Minero Argentino. Entre los datos relevantes se tuvieron en cuenta la presencia de centros volcánicos, de alteración hidrotermal y la mención de tenores radimétricos de uranio más elevados en la zonas de las estancias El Fénix, El Dorado-Montserrat y al norte de Cerro Vanguardia (Echeveste *et al.* 2001, Echevarría 2004, Peñalva 2004 a y b, Peñalva *et al.* 2004, Alperín *et al.* 2007, Sruoga *et al.* 2008). En la Cordillera Patagónica la selección de las dos zonas se basó en datos de relevamientos aero-radimétricos y terrestres realizados por la CNEA en las décadas del '50 y del '70 (Benítez *et al.* 2002) y en el reconocimiento previo de un área de caldera en la estancia La Peligrosa (Sruoga *et al.* 2010). En esta contribución se presentan nuevos datos de espectrometría gamma terrestre y de geoquímica de rocas de las volcanitas del Complejo Bahía Laura y del Complejo El Quemado, tomados en las áreas arriba mencionadas, con el objetivo de evaluar

el comportamiento del uranio y su potencial para formar depósitos dentro de esta provincia volcánica.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La Provincia Volcánica Riolítica Chon Aike fue definida por Kay *et al.* (1989) y se extiende a lo largo de toda la Patagonia hasta la Antártida y desde la cordillera hasta la plataforma continental, cubriendo una superficie estimada de 1.000.000 km². Debido a su homogeneidad composicional en el rango dacítico-riolítico y su enorme volumen constituye un ejemplo de Large Igneous Province (LIP) silícea (Pankurst *et al.* 1998). De edad jurásica, su emplazamiento abarca el lapso Bajociano-Kimmeridgiano, registrándose las edades más antiguas (188 Ma) en el sector oriental de la provincia volcánica y las más jóvenes (152 Ma) en el sector cordillerano (Pankurst *et al.* 2000). La Provincia Chon Aike Sur se extiende al sur del río Deseado y abarca el Macizo del Deseado, el subsuelo de la cuenca Austral, la Cordillera Patagónica Austral, la plataforma continental y la Península Antártica, recibiendo localmente distintos nombres formacionales tales como Complejo El Quemado, Complejo Bahía Laura, Formación Chon Aike, Serie Tobífera y Formación Lemaire.

El origen y evolución de la Provincia Volcánica Chon Aike se hallan vinculados al proceso de extensión regional que afectó la mayor parte del margen gondwánico desde tiempos triásicos. La migración del volcanismo hacia el oeste estaría reflejando cambios tectónicos vinculados al desplazamiento de bloques de la corteza al alejarse de la pluma del Karoo, así como al aumento de la velocidad de convergencia en el margen Pacífico hacia finales del Jurásico (Storey *et al.* 1992, Rapela *et al.* 2005).

En el ámbito del Macizo del Deseado el inicio del rifting se halla representado por depósitos clásticos alojados en cuencas tafrogénicas, de sentido submeridiano, de edad triásica superior (Formación El Tranquilo) y liásica (Formación Roca

Blanca). La respuesta magmática al régimen extensional está dada por el emplazamiento de cuerpos graníticos someros y pórfidos riolíticos de edad triásica (Granito Bajo de la Leona y Granito La Golondrina), andesitas y basandesitas del Jurásico Medio (Formación Bajo Pobre) y riolitas e ignimbritas con intercalaciones tufíticas del Jurásico Medio a Superior (Grupo Bahía Laura, Formación Chon Aike y Formación La Matilde). Litológicamente la Formación Chon Aike está compuesta por rocas piroclásticas, en particular ignimbritas, en aproximadamente un 85%, en tanto que el resto se halla integrado por términos epiclásticos (tobas retrabajadas y depósitos finos de ambiente lacustre y fluvial de baja energía) y lávicos (domos y coladas). Su composición es predominantemente riodacítica y riolítica, con intercalaciones muy subordinadas de andesitas. La geoquímica de estas rocas muestra un componente de subducción en la zona occidental, lo cual permite asociar a las ignimbritas cordilleranas con la actividad de un arco volcánico durante el Jurásico Superior, en tanto que hacia el este, las volcanitas presentan algunas características de intraplaca (Pankhurst *et al.* 1998).

En el este del Macizo del Deseado se ha sugerido la existencia de estructuras de caldera en el en la región del río Seco (Chernikoff y Salani 2002) y en el cerro Torta (Guido 2004) y más al oeste, en el área de El Dorado-Montserrat, de calderas de tipo *trap-door* o combinado (Sruoga *et al.* 2008). No obstante, el caso mejor documentado es el de la caldera La Peligrosa, en la sierra Colorada de la Cordillera Patagónica Austral (Sruoga *et al.* 2010). Los estudios más recientes concluyen que existe una clara relación entre las estructuras jurásicas y el emplazamiento del volcanismo (Sruoga *et al.* 2008 y 2010). Estas estructuras constituyen *grabens* o *hemi-grabens* relacionados al rifting y están limitados por fallas normales de rumbo N-S a NNO en la cuenca del Deseado y E-O en el área de la cuenca de San Julián (Homoc y Constantini 2001). Se ha definido un régimen transtensional con diferentes direcciones de extensión predominantes,

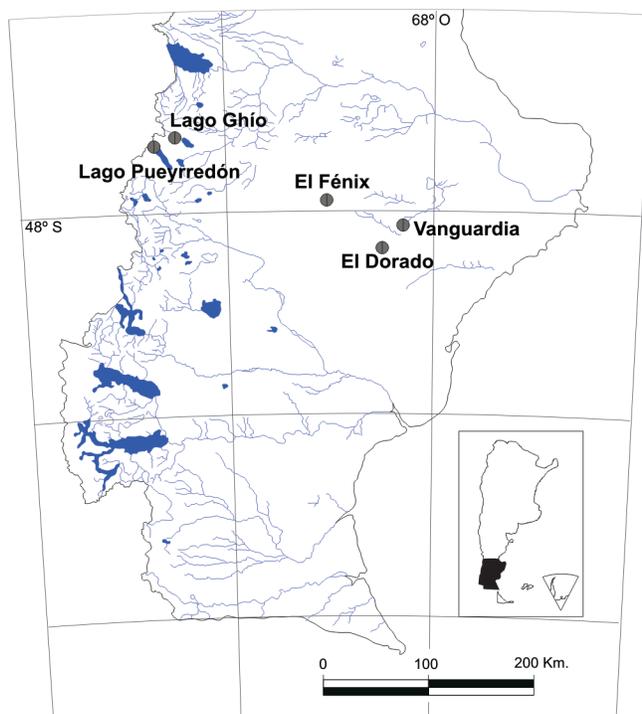


Figura 1: Mapa de ubicación de las áreas relevadas en la provincia de Santa Cruz.

tanto en el Macizo del Deseado (ENE y NNO) como en la zona cordillerana (NE y NO) (Japas *et al.* 2011).

Dentro del Macizo del Deseado se encuentran numerosas manifestaciones epitermales de Au-Ag de baja sulfuración, principalmente vinculadas tanto espacial como temporalmente con las Formaciones Chon Aike y La Matilde (Fernández *et al.* 2008 y referencias allí citadas). La vinculación entre la existencia de estructuras de caldera con la génesis del volcanismo silíceo y con las mineralizaciones asociadas, no están totalmente resueltas en el área. Si bien la mayor parte de los depósitos vetiformes estarían controlados por fallas vinculadas al rifting triásico-jurásico, algunos autores sostienen que existe una relación estrecha entre la mineralización y las estructuras de caldera (Guido 2004).

METODOLOGÍA

Los relevamientos radiométricos constituyen una herramienta rápida y poderosa para proveer información sobre la distribución y concentración del uranio (U), torio (Th), y potasio (K), y por lo tanto, resultan muy útiles para la exploración de

recursos minerales a los que se asocia la radioactividad. Debe tenerse en cuenta, sin embargo que el alcance de este método es superficial y que para detectar un área mineralizada la misma debe estar aflorando. El objetivo principal de este trabajo es el de evaluar el comportamiento del U, Th y K (principalmente el del uranio) en las distintas litologías volcánicas, en las zonas de alteración y en áreas relacionadas con estructuras. Como se explicó anteriormente se seleccionaron cinco zonas (Fig. 1) sobre las cuales existía información geológica de detalle (Echeveste *et al.* 2001, Echavarría *et al.* 2005, Sruoga *et al.* 2008 y 2010) y antecedentes de valores radiométricos más elevados (Benítez *et al.* 2002, Peñalva 2004a). Una de estas áreas (estancia El Fénix) se escogió con el propósito de contar con un patrón de comparación de los resultados obtenidos, ya que coincide parcialmente con la relevada anteriormente por Peñalva (2004b). Se utilizó un espectrómetro portátil (Exploranium-GR 320[®]) con el cual se tomaron tres mediciones sobre la misma litología en cada estación y se calculó el valor promedio. Los valores resultantes de U y de Th se expresan como ppm equivalentes (eU y eTh) ya que corresponden a los ni-

veles de energía del ²¹⁴Bi (serie de decaimiento del ²³⁸U) y del ²⁰⁸Tl (serie de decaimiento del ²³²Th), respectivamente. El K % rad. se determina directamente a partir de la serie de decaimiento del ⁴⁰K.

Se realizaron mediciones espectrométricas en andesitas de la Formación Bajo Pobre, en ignimbritas, en riolitas, en tobos de caída y en sedimentos lacustres correspondientes al Complejo El Quemado; en la zona de la caldera La Peligrosa se midieron las diferentes litologías descritas por Sruga *et al.* (2010). En el Complejo Bahía Laura se midieron valores en ignimbritas, riolitas y otras litologías siguiendo las facies descritas por Echeveste *et al.* (2001), Alperín *et al.* (2007) y Sruga *et al.* (2008). Algunos datos fueron relevados en las areniscas de la Formación Roca Blanca y en tobos de caída de la Formación Baqueró. Unos pocos datos provienen de ignimbritas silicificadas (estancia La Valenciana), las cuales están relacionadas con las mineralizaciones epitermales. Asimismo, se tomaron muestras para estudios petrográficos y análisis químicos, los cuales se llevaron a cabo en los laboratorios de la Comisión Nacional de Energía Atómica por fluorescencia láser e ICP-AES y en Actlabs (Canadá) por ICP-MS. Estos datos químicos se compararon con los datos espectrométricos con el objetivo de establecer el grado de confiabilidad de estos últimos. En las secciones delgadas se realizaron observaciones con el propósito de definir los tipos de alteraciones y otras características de las rocas que puedan influir en las mediciones realizadas.

RESULTADOS

En todas las áreas relevadas se hallaron resultados similares: los valores espectrométricos terrestres muestran buenas correlaciones con los datos químicos de roca (ICP-MS, Actlabs, Canadá) tanto para el K % rad. como para el eTh; en tanto que en el caso del eU, la correlación con el valor de U químico es menor (Fig. 2). Esto es causado frecuentemente por la falta de equilibrio entre el contenido de ²¹⁴Bi y la serie de decaimiento del ²³⁸U (Chiozzi *et al.* 2002). En los gráficos de la figura 2,

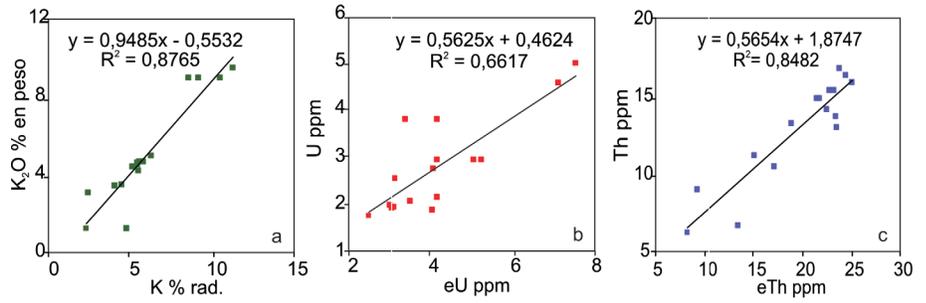


Figura 2: Comparación entre valores de ICP-MS y de radimetría gamma portátil del Th, K y U en rocas del Complejo Bahía Laura.

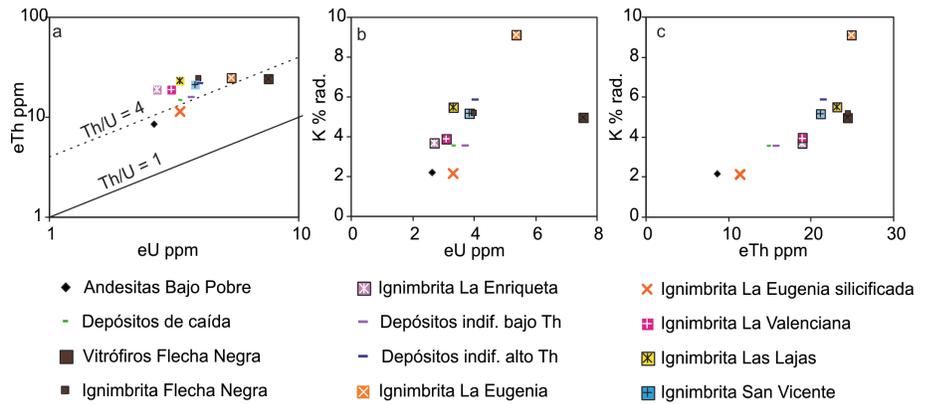


Figura 3: Gráficos de eU vs. eTh, eU vs. K % rad. y de eTh vs. K % rad del Complejo Bahía Laura en la zona de la estancia El Fénix.

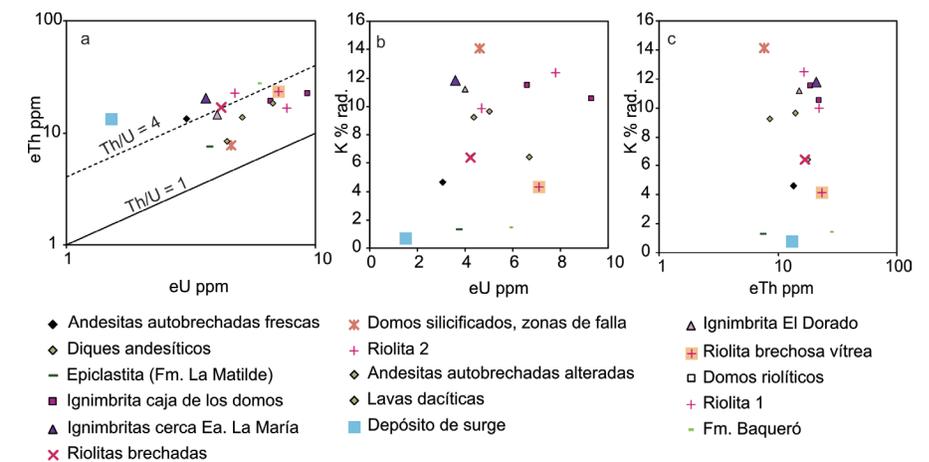


Figura 4: Gráficos de eU vs. eTh, eU vs. K % rad. y de eTh vs. K % rad del Complejo Bahía Laura en la zona de las estancias El Dorado y Montserrat. Se muestran datos de la Formación Baqueró (Cretácico).

correspondientes a muestras del complejo Bahía Laura se observa además que, los datos espectrométricos son sistemáticamente más elevados que los químicos. En algunas de las muestras del Complejo El Quemado, el tenor de K % rad. es inferior al contenido de K₂O % en peso, en tanto que en el caso del U y del Th se mantienen

las mismas relaciones. Los tenores de U varían con la composición de las rocas y se modifican con la alteración. Considerando que el Th es un elemento que se encuentra asociado a minerales refractarios su movilidad es baja con respecto al U y al K siendo, por lo tanto, un buen indicador del contenido original de las rocas. Es así

CUADRO 1: Datos radimétricos y químicos provenientes de la zona de Estancia El Fénix.

Complejo Bahía Laura Unidad	K (%) rad.		K ₂ O%		eTh (ppm)		Th (ppm)		eU (ppm)		U (ppm)	
Ignimbrita Las Lajas	5,50	4,84	4,20	23,14	21,89	13,70	3,32	1,97				
Ignimbrita Flecha Negra	5,18	4,62	4,575	24,55	21,19	16,10	3,99	2,97				
Ignimbrita Flecha Negra (vitrófiros)	5,00		4,40	24,43		16,40	7,53	4,96				
Ignimbrita La Eugenia (brechas)	9,13		9,00	24,90		15,05	5,35	2,93				
Ignimbrita San Vicente	5,17	3,53	4,60	21,08		14,90	3,83	2,93				
Ignimbrita La Valenciana	3,90	5,35	3,45	18,93	15,91	13,30	3,08	2,53				
Ignimbrita La Enriqueta	3,70	4,71		18,9	17,87			2,7				
Formación Bajo Pobre	2,18		2,18	8,6	14,33	7,68	2,62	1,83				
Depósitos de caída	3,53			14,65			3,3					
Depósitos indiferenciados ácidos	5,87		4,95	21,52		14,9	4,02	2,74				
Depósitos indiferenciados mesosilíceos	3,55			15,8			3,70					
Brechas de sílice en ignimbrita La Eugenia	2,17			11,35			3,33					

En negrita los valores de Peñalva (2004a).

CUADRO 2: Datos radimétricos y químicos provenientes de la zona de Estancias El Dorado-Montserrat.

Complejo Bahía Laura Unidad	K (%) rad.		K ₂ O%		eTh (ppm)		Th (ppm)		eU (ppm)		U (ppm)	
	rf	ra	rf	ra	rf	ra	rf	ra	rf	ra	rf	ra
Facies lávico-hipabisal mesosilícica												
Andesitas autobrechadas	4,65	9,67	1,25		13,45	14,12	6,70		3,05	5,02	1,94	
Diques andesíticos		9,25				8,60				4,35		
Lavas dacíticas		6,45				17,95				6,70		
Facies piro-epiclástica												
Epiclastita (La Matilde)	1,30				7,55				3,75			
Depósito de surge	0,70				13,50				1,50			
Ignimbrita caja de los domos	11,50				19,00				6,60			
Facies ignimbritica soldada												
Ignimbrita El Dorado	11,20		9,50		15,10		11,2		4,00		1,87	
Ignimbritas cerca de la Ea. La María	11,80				20,90				3,60			
Facies lávico-hipabisal riolítica												
Riolita brechosa vítrea	4,30		3,50		23,50		13,00		7,10		4,54	
Riolitas brechadas	6,42				17,05				4,20			
Domos riolíticos	10,50				22,30				9,30			
Domos silicificados zona de falla	14,10				7,60				4,60			
Riolita 1	12,40				16,60				7,80			
Riolita 2	10,00				22,40				4,70			
F. Baqueró	K (%) rad.		K ₂ O%		eTh (ppm)		Th (ppm)		eU (ppm)		U (ppm)	
	rf	ra	rf	ra	rf	ra	rf	ra	rf	ra	rf	ra
	1,43				27,60				5,87			

(rf: roca fresca, ra: roca con alteración).

que, la relación Th/U puede ser utilizada como una medida del enriquecimiento o pérdida de uranio (Castor y Henry 2000). En riolitas frescas la relación Th/U suele ser de 2 a 3 (Nash 2010).

Macizo del Deseado-Complejo Bahía Laura

a) *Zona de la estancia El Fénix:* Los resultados promedio K%, rad, eTh y eU de las estaciones medidas así como los datos

químicos discriminados de acuerdo a las diferentes litologías se presentan en el cuadro 1. En la misma se incluyen también los datos espectrométricos terrestres de K % rad. y de eTh medidos por Peñalva (2004a), los cuales son similares a los de este trabajo, aunque levemente inferiores, con excepción de los correspondientes a la Formación Bajo Pobre. Los valores de eU más elevados pertenecen a los vitrófiros de la base de la ignimbrita Flecha Negra, lo cual es compatible con la concentración de este elemento en los vidrios volcánicos silíceos (Zielinski 1985). Tenores altos de eU se encuentran también en las brechas de la Ignimbrita La Eugenia. Los valores de eTh son más elevados en las ignimbritas más evolucionadas, que están representadas en esta zona por las Ignimbritas Las Lajas y La Flecha Negra (Alperín *et al.* 2007). Estos tenores son elevados también en las Ignimbritas La Eugenia y San Vicente, y descienden en la Ignimbrita La Valenciana, en los depósitos de caída y en las brechas silicificadas y venas de cuarzo de la Ignimbrita La Eugenia. Los valores de eTh son más elevados en las ignimbritas más evolucionadas, que están representadas en esta zona por las Ignimbritas Las Lajas y La Flecha Negra (Alperín *et al.* 2007). Estos tenores son elevados también en las Ignimbritas La Eugenia y San Vicente y descienden en la Ignimbrita La Valenciana, así como en los depósitos de caída y en las brechas silicificadas (venas de cuarzo) de la Ignimbrita La Eugenia.

Los valores de K % rad. presentan un comportamiento similar a los de eTh, aunque incrementan notoriamente en la ignimbrita La Eugenia, en la cual se observa una abundante recristalización en fase vapor de los feldespatos y decrecen en las brechas silicificadas (venas de cuarzo). Las relaciones eTh/eU de estas rocas (Fig. 3a) son algo superiores a los valores promedio de la corteza (3,5) y en algunas ignimbritas pueden alcanzar valores de entre 6 y 7, sugiriendo posibles pérdidas de uranio a partir de su remoción de la fase vítrea. En las muestras con enriquecimiento relativo de eU, esta relación disminuye a 3,25 como es el caso de las ignimbritas silicificadas, con venas de cuarzo. Si bien el

contenido de estos tres elementos es muy bajo en el cuarzo, el U puede ser removilizado de la roca de caja, transportado por las soluciones hidrotermales y finalmente retenido por esa fase. El eU y el eTh correlacionan positivamente con el K % rad. hasta un valor de 6 %; los valores más altos corresponden a muestras con metasomatismo potásico (Figs. 3b y 3c). Según lo observado por Páez *et al.* (2010), el U tiende a disminuir durante este proceso, lo cual no se corrobora en este caso.

b) Zona de El Dorado-Montserrat: Los datos obtenidos se presentan en el cuadro 2 en la cual se discriminaron las muestras con alteración (ra) y las rocas más frescas (rf). Esta separación se realizó considerando como muestras alteradas a aquellas que contenían tenores elevados de K % rad. y presentaban evidencias de alteración en el corte delgado tales como una abundante recristalización de los feldespatos y una desvitrificación y recristalización muy intensa de las pastas vítreas a agregados fel-síticos, esferulíticos y granofíricos. Los tenores de eU son más variables y algo más elevados que en la zona de El Fénix; tanto en la roca fresca como en la roca alterada, correspondiendo los valores máximos a las facies lávicas riolíticas, que son las póstumas. Se considera que, dada su inmovilidad y su correlación positiva con la sílice, el Th es representativo de la diferenciación magmática (véase Fig. 7). Los valores de eTh se comportan de manera similar al eU y disminuyen en las zonas silicificadas. Los tenores de K % rad. son sumamente elevados en todas las facies medidas, aun en las andesíticas. Unas pocas muestran valores normales (4,30 % de K % rad., 3,5 % en peso de K₂O químico, cuadro 2). En el diagrama eU vs. eTh se observa cierto enriquecimiento de U respecto del Th en algunas riolitas y domos riolíticos silicificados y en zonas de falla (Fig. 4a). No se observan correlaciones entre el eU y el eTh con el K % rad (Figs. 4b y c). Estas relaciones pueden haberse modificado por el efecto del metasomatismo potásico.

c) Zona de Vanguardia: En esta zona ubicada al norte de cerro Vanguardia se midieron unas pocas estaciones (Cuadro 3 y Figs. 5a,b y c). El comportamiento del K % rad.

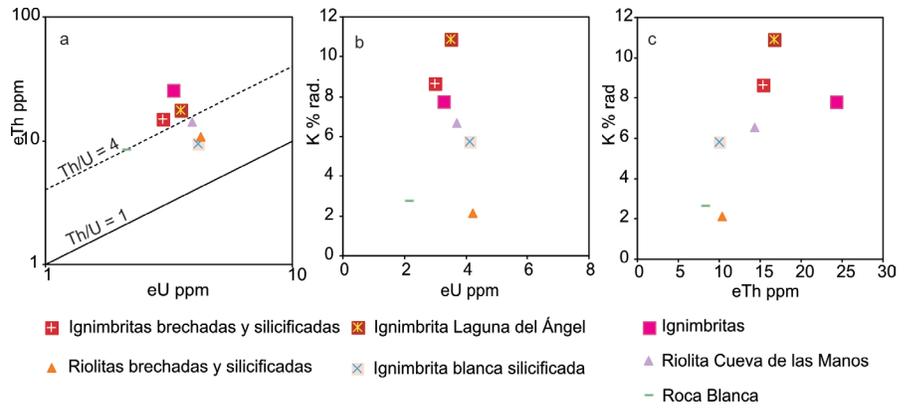


Figura 5: Gráficos de eU vs. eTh, eU vs. K % rad. y de eTh vs. K % rad. del Complejo Bahía Laura en la zona norte de Cerro Vanguardia. Se muestran datos de la Formación Roca Blanca (Jurásico Inferior).

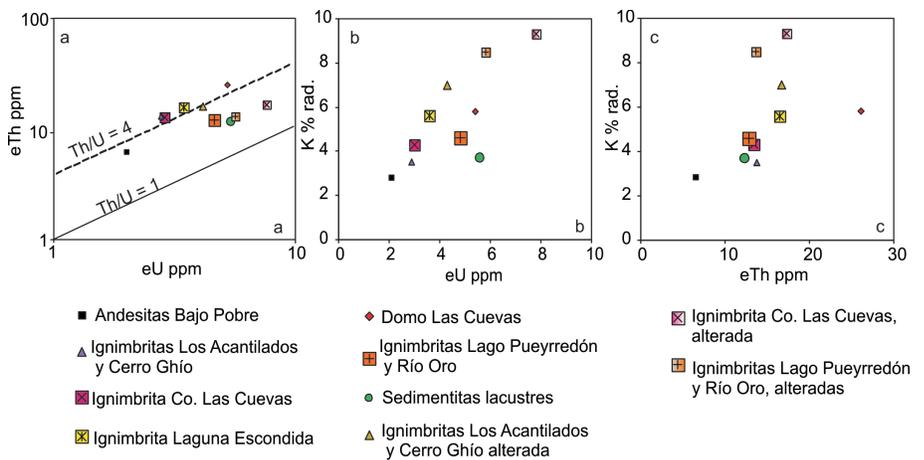


Figura 6: Gráficos de eU vs. eTh, eU vs. K % rad. y de eTh vs. K % rad del Complejo El Quemado en la zona de la estancia La Peligrosa, lago Pueyrredón y río Oro.

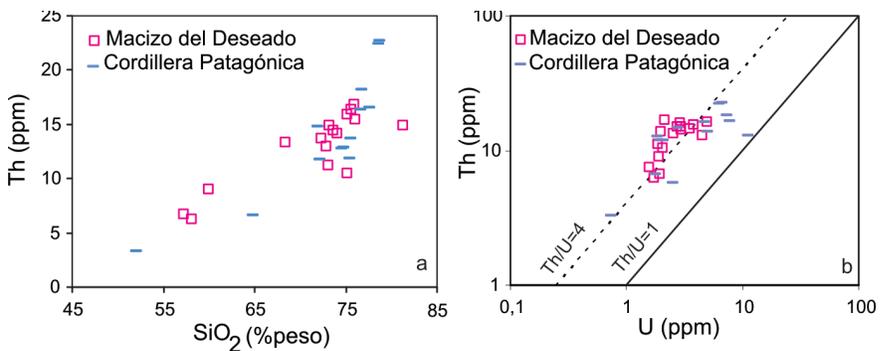


Figura 7: a) Gráfico de SiO₂ vs. Th que muestra la correlación positiva entre ambos elementos en volcanitas de los Complejos Bahía Laura (Macizo del Deseado) y El Quemado (Cordillera Patagónica). b) Relación entre los tenores de U y de Th químicos en ambas series estudiadas.

es similar al que se observa en la zona de El Dorado-Montserrat; en estas rocas los tenores de K % rad. son muy elevados debido a la desvitrificación y recristalización muy penetrante de las pastas vítreas y a la recristalización de los feldespatos. El eU está levemente enriquecido en las áreas si-

licificadas respecto al eTh y al K % rad. los cuales decrecen con la silicificación.

Cordillera Patagónica-Complejo El Quemado

a) Zona de Estancia La Peligrosa: Las facies que fueron analizadas son las reconoci-

CUADRO 3: Datos radimétricos y químicos provenientes de la zona norte de Cerro Vanguardia.

Complejo Bahía Laura Unidad	K (% rad.)	K ₂ O%	eTh (ppm)	Th (ppm)	eU (ppm)	U (ppm)
Ignimbritas	7,80		24,70		3,35	
Ignimbritas silicificadas y brechadas	8,65		15,00		3,05	
Riolitas brechadas y silicificadas	2,17		10,47		4,20	
Ignimbrita Laguna del Angel	10,95	9	17,15	10,5	3,45	2,06
Ignimbrita blanca silicificada	5,80		10,00		4,20	
Riolita Cueva de las Manos	6,70	5,4	14,30	7,52	3,80	1,56
F. Roca Blanca	K (% rad.)	K ₂ O%	eTh (ppm) <td>Th (ppm) <td>eU (ppm) <td>U (ppm)</td> </td></td>	Th (ppm) <td>eU (ppm) <td>U (ppm)</td> </td>	eU (ppm) <td>U (ppm)</td>	U (ppm)
	2,70		8,65		2,15	

CUADRO 4: Datos radimétricos y químicos provenientes de la zona cordillerana, lago Ghío, lago Pueyrredón y el Complejo El Quemado.

Complejo El Quemado Unidad	K (% rad.)		K ₂ O%		eTh (ppm)		Th (ppm)		eU (ppm)		U (ppm)	
	rf	ra	rf	ra	rf	ra	rf	ra	rf	ra	rf	ra
Andesitas Bajo Pobre	2,80		4,16		6,60		6,63		2,10		1,78	
Ignimbrita Los Acantilados y Cerro Ghío	3,50	7,00	4,32	6,10	13,80	16,70	11,80	14,78	2,90	4,30	2,07	2,76
Ignimbrita Cerro Las Cuevas	4,30	9,30	5,27		13,40	17,30	11,90		3,00	7,80	1,94	
Ignimbrita Laguna Escondida	5,60		9,33		16,50		13,70		3,60		4,99	
Domo Las Cuevas	5,80		5,21	8,77	26,10		22,70	22,40	5,40		6,64	6,22
Ignimbritas Lago Pueyrredón-Río Oro	4,60	8,50	4,95	10,69	12,80	13,70	12,80	12,90	4,80	5,80		11,10
Sedimentitas lacustres	3,70				12,40				5,60		1,85	
Vitrófiros			2,19	2,86			16,40	18,20	2,10		4,72	7,23

(rf: roca fresca, ra: roca alterada).

das por Sruoga *et al.* (2010) y los resultados se presentan en el cuadro 4 y en las figuras 6a, b y c. En este caso se discriminaron las muestras con alto K % rad. y con alto contenido de K₂O % en peso. Las alteraciones que afectan las distintas facies de la caldera La Peligrosa fueron descritas por Sruoga *et al.* (2010). Además de la recristalización de los feldspatos y de la desvitrificación de las pastas vítreas, contribuye al elevado contenido de K la presencia de una alteración propilitica con arcillas interestratificadas, sericita, cloritas y carbonatos. Los tenores de eTh así como los de eU son algo más elevados en las rocas alteradas. Las ignimbritas de La Peligrosa se caracterizan por tener un alto contenido de cristales en relación con las ignimbritas analizadas en el complejo Bahía Laura, por lo cual su contenido de material vítreo es menor. Los tenores más elevados de uranio y torio tanto químico como radimétrico se encuentran en

el domo Las Cuevas el cual representa la facies póstuma más diferenciada y en zonas de falla asociadas a este domo incrementa aún más el contenido de U. Las relaciones eTh/eU indican que las rocas con mayor alteración están enriquecidas en U. La relación eTh/K % rad. es menor que en el caso de la zona de la estancia El Fénix, implicando un enriquecimiento de K para las rocas del Complejo El Quemado, el cual puede deberse a una mayor alteración, aunque no puede descartarse un origen magmático.

b) Zona de Lago Pueyrredón-Río Oro: Se observan resultados similares a los de la estancia La Peligrosa (Cuadro 4 y Fig. 6a, b y c). Los tenores más elevados de eU y de eTh se relacionan con aquellas rocas con mayor alteración arcillosa y con contenidos de K % rad. más alto. Se encuentran valores de uranio relativamente altos respecto al contenido de Th en zonas de fractura.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las rocas estudiadas han sufrido diferentes procesos los cuales se reflejan en el comportamiento de estos elementos (Th, U y K): Diferenciación magmática, cristalización en fase vapor, alteración hidrotermal, alteración supergénica. Los procesos de diferenciación magmática de las volcanitas están bien representados por el contenido de Th que correlaciona positivamente con la SiO₂, (Fig. 7a) y con valores de K % rad. menores que ~6. Asimismo, los valores de K % rad. más bajos presentan, en algunos casos, buena correlación con el U. Los tenores de K % rad. mayores que 6 estarían directamente relacionados con los fenómenos que ocurren en la etapa deutérica (cristalización en fase vapor y alteración potásica) (Sruoga *et al.* 2004, Peñalva *et al.* 2004, Sruoga *et al.* 2010, Páez *et al.* 2010), como con la presencia de alteraciones de illit-montmorillonita y de sericita (Peñalva *et al.* 2004). Los contenidos de uranio son más altos en las rocas más vítreas, como es el caso de los vitrófiros de la base de las ignimbritas, en zonas de fractura, e incrementan relativamente respecto al Th y al K en zonas de silicificación hidrotermal asociada a brechas (venas de cuarzo). En el primer caso, el incremento se explica porque el U es un elemento altamente incompatible que permanece en el fundido y se concentra en la matriz vítreo. En los últimos dos casos el U puede haber sido removilizado y reconcentrado. La relación Th/U decrece notoriamente en las zonas silicificadas evidenciando la escasez de Th en las soluciones que transportaron la sílice y la removilización de U y su retención posiblemente por fenómenos de adsorción. En el caso de las sedimentitas analizadas, las areniscas de la Formación Roca Blanca presentan bajos contenidos de U y de Th, las epiclastitas de la Formación La Matilde y los sedimentos lacustres de la zona cordillerana muestran una disminución del contenido de Th en relación con el de U, lo cual es común en este tipo de rocas. El magmatismo jurásico es predominantemente calcoalcalino con impronta de

arco volcánico, aun en las series más alejadas de la cadena andina. Los contenidos de Zr y de Nb son bajos tanto en las riolitas del Complejo El Quemado como en las del Complejo Bahía Laura y son típicos de riolitas subcalcinas de márgenes continentales y no de intraplaca (Pankhurst *et al.* 1998). Este tipo de rocas presenta concentraciones relativamente bajas de uranio y por lo tanto, este volcanismo no sería de los más promisorios para contener importantes yacimientos de este elemento. Sin embargo, el ambiente extensional, la presencia de centros volcánicos con facies póstumamente levemente enriquecidas en uranio y torio (como las de la caldera La Peligrosa) y de actividad hidrotermal son factores a tener en cuenta en la exploración por uranio.

Para evaluar a estas volcanitas como roca fuente de posibles yacimientos sedimentarios, alojados tanto en sedimentitas de ciclos anteriores como en sedimentitas re-trabajadas a partir de estas volcanitas, se pueden considerar las relaciones Th/U químicas (Fig. 7b). En algunas ignimbritas se observan relaciones Th/U cercanas a 7, estos valores indicarían en general, moderados aportes de U por parte de estas rocas a los acuíferos o a las soluciones hidrotermales. Si además se considera el enorme volumen de este volcanismo, no puede descartarse su importancia como posible roca fuente de uranio.

Los procesos formadores de un yacimiento de uranio en rocas volcánicas necesitan de múltiples etapas de transporte y de enriquecimiento que pueden durar varios millones de años, entre los cuales suele haber un proceso de pre-concentración. Con el uranio en general no se aplican las reglas para la concentración de otros metales los cuales se separan en una fase fluida (ver Nash 2010 y referencias allí citadas para un extenso tratamiento sobre el tema). Si bien pueden ser indicativas de algunos de estos procesos, las mediciones de espectrometría gamma tienen una penetración de pocos centímetros respecto de la superficie y no son concluyentes en la definición de blancos de exploración, al menos que se encuentre un indicio aflorando. Los resultados encontrados en este trabajo indican

que algunas concentraciones más elevadas de uranio se relacionan con fracturas, que hay enriquecimiento relativo de uranio en algunas silicificaciones de origen hidrotermal y que estas características deberían tomarse en cuenta en futuros relevamientos. La radimetría gamma es una herramienta útil para obtener información de manera expeditiva a nivel de la superficie por lo cual en el caso de depósitos ocultos se deben aplicar otras metodologías con mayor penetración en el subsuelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y por el subsidio de la Secretaría de Ciencia y Tecnología otorgado a la CNEA en el marco del proyecto "El potencial minero nuclear y metalífero de las provincias Choyoi en el Bloque de San Rafael y Chon-Aike en el Macizo del Deseado" (res.1473, expte. S.C.T.I.P. 1274/05). Se agradece el apoyo de la Empresa Fomicruz S.E., la colaboración de los colegas Diego Fracchia y Pedro Biscayart en la revisión de la versión preliminar del manuscrito y en la elaboración de gráficos y de los señores Juan Hidalgo y Oscar Comito en las tareas de campo. Los acertados comentarios del árbitro Dr. Jorge Chernicoff permitieron una mejora sustancial del mismo. Este trabajo forma parte del Simposio de Uranio realizado en el marco del 18° Congreso Geológico Argentino.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Alperin, M., Echeveste, H., Fernández, R. y Bellieni, G. 2007. Análisis estadístico de datos geoquímicos de volcanitas jurásicas del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62: 200-209.
- Benítez, A., Fuente, A. y Gayone, M.R. 2002. Manifestaciones uraníferas. En Haller, M.J. (ed.) *Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz*. Relatorio del 15° Congreso Geológico Argentino: 743-757, El Calafate.
- Castor, S.B. y Henry, C.D. 2000. Geology, geochemistry, and origin of volcanic rock-hosted uranium deposits in northwestern Nevada and southeastern Oregon, USA. *Ore Geology Reviews* 16: 1-40.
- Chernicoff, C.J. y Salani, F.M. 2002. Identificación de calderas asociadas a las volcanitas de la Formación Chon Aike en la región del río Seco, provincia de Santa Cruz. 15° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 23-28. Buenos Aires?
- Chiozzi P., Pasquale V. y Verdoya, M. 2002. Heat from radioactive elements in young volcanics by γ -ray spectrometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 119: 205-214.
- Cuney, M. y Kyser, K. 2008. Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration. *Mineralogical Association of Canada, Short Course Series Volume 39*, 257 p. Quebec, Canadá.
- Echavarría, L.E. 2004. Los fluidos hidrotermales formadores de la mineralización epitermal el Dorado-Monserrat, Macizo del Deseado. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 70-82.
- Echavarría, L.E., Schalamuk, I.B. y Etcheverry, R.O. 2005. Geologic and tectonic setting of the Deseado Massif epithermal deposits, Argentina, based on El Dorado-Monserrat. *Journal of South American Earth Sciences* 19: 415-432.
- Echeveste, H., Fernández, R.R., Belleini, G., Tessone, M., Llambías, E., Schalamuk, I., Piccirillo, E. y De Min, A. 2001. Relaciones entre las formaciones Bajo Pobre y Chon-Aike (Jurásico Medio a superior en el área Estancia El Fénix-Cerro Huemul), zona centro occidental del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56: 548-558.
- Fernández, R.R., Blesa, A., Moreira P., Echeveste, H., Mykietiuik, K., Andrada de Palomera, P. y Tessone, M. 2008. Los depósitos de oro y plata vinculados al magmatismo jurásico de la Patagonia: revisión y perspectivas para la exploración. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63: 66-681.
- Goodell, P.C. 1985. Classification and model of uranium deposits in volcanic environments. En *Uranium deposits in Volcanic Rocks: Proceedings International Atomic Energy Agency, Symposium. Uranium deposits in volcanic rocks: 1-16*, Vienna.
- Homocv, J.F. y Constantini, L. 2001. Hydrocarbon exploration potential within intraplate

- shear-related depocenters: Deseado and San Julián basins, southern Argentina. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 85: 1795-1816.
- Guido, D.M. 2004. Subdivisión litofacial e interpretación del volcanismo jurásico (Grupo Bahía Laura) en el este del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59: 727-742.
- Japas, M.S., Sruoga, P., Kleiman, L.E., Gayone, M.R. y Maloberti, A. 2011. Cinemática de la extensión jurásica vinculada a la gran provincia ígnea silícea Chon Aike, Santa Cruz, Argentina. 18° Congreso Geológico Argentino, Actas CD-rom, Neuquén.
- Kay, S.M., Ramos, V.A., Mpodozis, C., Sruoga, P., 1989. Late Paleozoic to Jurassic silicic magmatism at the Gondwana margin: analogy to the Middle Proterozoic in North America? *Geology* 17: 324-328
- Kleiman, L.E. y Ramos, V.A. 2005. Metalogénesis de uranio en la Argentina: principales épocas y ambientes geológico-tectónicos, perspectivas futuras. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 227-234, La Plata.
- Nash, J. T. 2010. Volcanogenic uranium deposits-Geology, geochemical processes, and criteria for resource assessment. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1001: 99 p., Reston.
- Páez, G.N., Ruiz R., Guido, D.M., Jovic, S.M. y Schalamuk, I.B. 2010. The effects of K-metasomatism in the Bahía Laura Volcanic Complex, Deseado Massif, Argentina: Petrologic and metallogenic consequences. *Chemical Geology* 273: 300-313.
- Pankhurst, R.J., Leat, P.T, Sruoga, P, Rapela, C.W., Márquez, M., Storey, B.C. y Riley, T.R. 1998. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica: A silicic large igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 81: 113-136.
- Pankhurst, R.J., Riley, T.R., Fanning, C.M. y Kelley, S.P. 2000. Episodic Silicic Volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of magmatism associated with the Break-up of Gondwana. *Journal of Petrology* 41: 605-625.
- Peñalva, G. 2004 a. Interpretación geológica del levantamiento gammaespectrométrico del Macizo del Deseado. Distribución de radioelementos (K, U, Th) en la Formación Chon-Aike. Serie Contribuciones Técnicas: Geofísica 13. SEGEMAR, Buenos Aires.
- Peñalva, G. 2004 b. Aplicación de la espectrometría de rayos gamma para la identificación de alteración hidrotermal en las volcanitas ácidas jurásicas del sector central del Macizo del Deseado. Serie Contribuciones Técnicas Geofísica 14, SEGEMAR, Buenos Aires.
- Peñalva, G.A., Chernicoff, C.J., Fernández, R.R. y Palacio, B. 2004. Identificación de alteración hidrotermal mediante la aplicación de espectrometría de rayos gamma, sector central del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. 7° Congreso de Mineralogía y Metalogía Actas 1: 267-272, Río Cuarto.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Fanning, C.M. y Hervé, F. 2005. Pacific subduction coeval with the Karoo mantle plume: the Early Jurassic Subcordilleran Belt of northwestern Patagonia. En Vaughan, A.P.M., Leat, P.T. y Pankhurst, R.J. (eds.) *Terrane Accretion Processes at the Pacific Margin of Gondwana*. The Geological Society, Special Publication 246: 217-239, London.
- Sruoga, P., Rubinstein, N. y Hinterwimmer, G. 2004. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobífera, South Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 132: 31-43.
- Sruoga, P, Busteros, A., Giacosa R., Martínez, H., Kleiman, L., Japas, S., Maloberti, A. y Gayone, M.R. 2008. Análisis litofacial y estructural del complejo volcánico Bahía Laura en el área el Dorado-Montserrat, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63: 653-664.
- Sruoga, P., Japas, M.S, Salani, F., Kleiman, L.E., y Rubinstein, N.A., 2010. Caldera La Peligrosa (47°15'S, 71°40'O): un evento clave en la provincia silícea Chon Aike. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66: 368-380.
- Storey, B.C., Alabaster, T., Hole, M.J., Pankhurst, R.J. y Wever, H.E. 1992. Role of subduction plate boundary forces during the initial stages of Gondwana breakup: evidence from the proto-Pacific margin of Gondwana. En Storey, B.C. Alabaster, T. y R.J. Pankhurst (eds.) *Magmatism and the causes of Continental Break-up*, Geological Society of London, Special Publications 68: 149-163.
- Zielinski, R.A. 1981. Experimental leaching of volcanic glass-Implications for evaluation of glassy volcanic rocks as sources of uranium. En Goodell, P.C., and Waters, A.C., (eds.), *Uranium in Volcanic and Volcaniclastic Rocks*, American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology volumen 13: 1-11.
- Zielinski, R.A. 1985. Volcanic rocks as sources of uranium. Current perspectives and future directions En *Uranium deposits in Volcanic Rocks: Proceedings International Atomic Energy Agency, Symposium Uranium deposits in volcanic rocks: 83-95*, Vienna.

Recibido: 1 de noviembre, 2012

Aceptado: 14 de marzo, 2013