

Pegmatitas, aplitas, greisen y anomalías de estaño en el leucogranito triásico de Paita, Piura

Alvaro Espinoza, Silvana Stipetich, Rodrigo Hurtado de Mendoza, Jorge Sáez y Jean Vallance

Especialidad de Ingeniería Geológica, Pontificia Universidad Católica del Perú,
Av. Universitaria 1801, San Miguel 15088, Lima, Perú. alvaro.espinozao@pucp.pe

1. Resumen

El Granito de Paita, en el norte del Perú, es un plutón peraluminoso, de tipo S, de edad triásica, el cual ha intruido a una secuencia metasedimentaria de edad paleozoica. El plutón muestra una evolución desde facies de leucogranito de biotita-muscovita hacia facies de turmalina-muscovita. Este complejo granítico alberga una serie de cuerpos miarolíticos, zonas de borde con textura de solidificación unidireccional y diques de pegmatitas, aplitas y bandas de aplita-pegmatita. Todos estos cuerpos ígneos presentan anomalías de Sn (8–15 ppm) y el desarrollo de alteración hidrotermal tipo greisen parece ser coetáneo a las pegmatitas miarolíticas tempranas, llegando a presentar un enriquecimiento en Sn, de hasta 31 ppm. Hasta la actualidad, no se ha observado la casiterita, y se infiere que el Sn está principalmente hospedado en las micas.

2. Abstract

The Paita Granite in northern Peru is a composite peraluminous S-type Triassic pluton that has intruded into a series of paleozoic metasedimentary rocks. The pluton shows an evolution from biotite-muscovite to tourmaline-muscovite bearing leucogranite facies. This granite complex hosts a series of pegmatite, aplite, layered aplite-pegmatite bodies of miarolitic, to unidirectional solidification textures, and dike geometry. All these igneous bodies show Sn anomalies (8 to 15 ppm). The development of greisen-type hydrothermal alteration appears to be coeval with the early miarolitic pegmatite and is related to a Sn enrichment up to 31 ppm. During an ongoing study, no cassiterite was observed and it is inferred that Sn is mainly hosted in micas.

3. Introducción

Las mineralizaciones económicas de Sn y W están esencialmente relacionadas a intrusiones

graníticas peraluminosas de tipo S (Blevin and Chapell, 1995; Černý et al., 2005). Ejemplos de estos depósitos se encuentran en distritos históricos como Cornwall (Gran Bretaña), Erzgebirge (Alemania) y en el cinturón estannífero Peruano-Boliviano (Triásico).

El Granito de Paita, departamento de Piura, es un granito peraluminoso de dos micas, de tipo S y con contenidos anómalos de Sn (Bellido et al., 2009; Espinoza y Stipetich, 2019), características que sugirieren la posible presencia de mineralizaciones a Sn ± W.

En esta publicación se presentan los avances, de un estudio en curso sobre el granito de Paita, que comprenden las descripciones petrográficas y geoquímicas de las diferentes facies de granitos, pegmatitas y aplitas, y de las alteraciones sódica y greisen identificadas.

4. Marco Geológico

4.1. Geología Regional

En la costa norte del Perú afloran rocas metasedimentarias, de diferentes grados de metamorfismo (filitas, esquistos, gneises y migmatitas); cuyas edades abarcan desde el Precámbrico hasta el Pérmico, y que conforman el Dominio Geotectónico Amotape-Tahuín (Caldas et al., 1980; Palacios, 1994; Bellido et al., 2009)

Intruyendo a los metasedimentos, se encuentran diferentes cuerpos ígneos de edad triásica clasificados, según su nivel de emplazamiento, en catazonales y epizonales (Bellido et al., 2009). Los primeros son granitoides que no se separaron totalmente de su fuente de fusión, mientras que los segundos son más someros y desenraizados.

4.2. Geología Local

En el Macizo de Paita, la secuencia metasedimentaria está conformada por pelitas con intercalaciones de estratos decimétricos a métricos de areniscas fuertemente plegadas y asociadas al

desarrollo de al menos dos foliaciones sucesivas (Espinoza y Stipetich, 2019). Estos autores pusieron en evidencia dos principales eventos metamórficos: un primer evento regional M1 responsable de la formación de pizarras de facies de clorita; y un evento térmico M2 asociado al emplazamiento del Granito de Paita y responsable de la neoformación de biotita y porfidoblastos de cordierita y andalucita.

El Granito de Paita es un pequeño plutón de edad triásica (Bellido et al., 2009; Sánchez et al., 2006). La facie principal es de monzogranito peraluminoso, de dos micas, de grano fino, de tipo S, con indicios de deformación. Los contactos con la roca metasedimentaria de caja son subverticales, y la presencia de enclaves angulosos, métricos a decamétricos, de roca caja en la parte sur del plutón indica un emplazamiento por *stopping* magmático.

5. Cuerpos magmáticos

5.1. Granitos

Se han reconocido al menos siete facies de granito en base a granulometría, textura, mineralogía, y presencia o ausencia de deformación, y enclaves biotíticos; con la característica común de ser equigranulares entre las facies. La facie principal es monzogranito de biotita-muscovita de grano fino localmente intruido por una facie de mineralogía similar, pero de grano medio, produciendo zonas de mezcla heterogénea (*mingling*) con el primero. Ambas facies presentan una foliación resaltada en el alineamiento de biotita (granito “gneisificado” de Palacios, 1994). Las otras facies de granito son posteriores y no presentan tales deformaciones. Se identificaron: un granito de biotita-muscovita de grano fino con abundantes enclaves biotíticos (<5 cm), un granito de biotita-muscovita de grano fino a medio con pocos fenocristales de feldespato potásico, un granito marginal de muscovita-biotita de grano fino a medio y un granito fino de turmalina-muscovita.

Bajo el microscopio, los granitos de dos micas presentan composiciones monzograníticas a sienograníticas con cuarzo, feldespato potásico (microlina>ortoclasa), plagioclasa, biotita, muscovita; accesorios de apatito y zircón, y trazas de granate y topacio. Las texturas son hipidiomórficas con frecuentes intercrecimientos micrográficos. La muscovita es tardía formando cristales intersticiales localmente esqueléticos y a veces interestratificados con biotita.

El granito de turmalina-muscovita, sin biotita, es de grano fino con textura hipidiomórfica, con

cuarzo, plagioclasa > feldespato potásico, muscovita, turmalina, y con granate y zircón de accesorios. Este granito no presenta texturas micrográficas y las turmalinas forman granos subhedrales a euhedrales con inclusiones de zircón.

5.2. Pegmatitas y Aplitas

Diferentes cuerpos de aplita, pegmatita, y aplopegmatita bandeada cortan a todas las facies graníticas antes mencionadas. Las pegmatitas son de tres tipos: miarolíticas, marginales con textura de solidificación unidireccional y diques. Las pegmatitas miarolíticas son cuerpos irregulares (<30 cm) presentes, esencialmente, en los granitos de biotita-muscovita, pero también en el granito de turmalina-muscovita, donde están concentradas hacia el contacto con su encajonante. Las pegmatitas marginales son cuerpos discontinuos de extensión métrica y de potencia menor a 20 cm, ubicados en el contacto entre los granitos de dos micas y la caja metasedimentaria, y presenta textura de solidificación unidireccional con los típicos feldespatos potásicos plumosos extendiéndose desde la caja hacia el intrusivo. Los diques de pegmatita son tardíos ya que intruyen de manera cortante a todas las facies graníticas. Estos diques presentan una orientación ONO-ESE con buzamiento subvertical, su extensión puede alcanzar los 100 m y potencias menores a 0.5 m.

La mineralogía de las pegmatitas y aplitas comprende cuarzo, feldespatos, turmalina, muscovita, y como accesorios apatito y granate. El tamaño de los granos puede alcanzar los 10 cm y se puede observar frecuentemente una zonación con muscovita hacia el exterior, pasando a feldespato potásico y turmalina, y cuarzo masivo ocupando la parte central; localmente se observaron zonas gráficas. La muscovita puede ser primaria o producto de alteración del granito encajonante, particularmente en el caso de las pegmatitas miarolíticas.

Las aplitas se presentan en diques de potencia menores a 1 m, son paralelas y espacialmente asociadas a los diques de pegmatita. Pueden presentar una textura homogénea o bandeada con cristales de turmalina, de hasta 3 cm, con crecimiento perpendicular a los hastiales de los diques, pasando a una zona interna libre de turmalina. Las aplitas presentan una mineralogía constituida por cuarzo, plagioclasa > feldespato potásico, turmalina, muscovita; además de apatito, granate y topacio como accesorios.

Los cuerpos de aplopegmatita forman localmente sills compuestos por lechos rítmicos y subhorizontales de pegmatita y aplita ubicados en el contacto entre dos facies graníticas. Tienen una potencia de hasta 1 m y extensiones de hasta 10 m. Los cuerpos de aplopegmatita más frecuentes, sin embargo, son diques tardíos, cuya mineralogía y orientación es la misma que los diques de aplita y de pegmatita, sugiriendo una génesis sincrónica. Su potencia puede alcanzar hasta los 2 m y comprenden una alternancia de lechos de aplita y pegmatita paralelos a las paredes con capas de aplita concentradas hacia las paredes y capas de pegmatita hacia el centro.

6. Alteraciones Hidrotermales

6.1. Albitización

La albitización corresponde a un reemplazamiento parcial a total de ortoclasa y microlina por una plagioclasa sódica con macla tipo *chessboard*. La albita hidrotermal, está presente tanto en los granitos de dos micas, como en las pegmatitas y sobre todo en las aplitas.

6.2. Greisenización

La manifestación greisen más frecuente corresponde a pequeñas bandas (<3 cm, excepcionalmente 20 cm) de remplazamiento de las facies de granito de dos micas por muscovita de grano medio a grueso y cuarzo. Esas bandas adoptan frecuentemente una morfología sinuosa y anastomosada, ocasionalmente similar a un *stockwork*. Las bandas más potentes son más rectilíneas.

Localmente se pudo observar una transición continua desde los halos de muscovita de las pegmatitas miarolíticas hacia las bandas de alteración greisen, tanto dentro de las facies de granito de dos micas como en los contactos externos del granito de turmalina, sugiriendo contemporaneidad entre la fase pegmatítica miarolítica y la alteración hidrotermal.

Bajo el microscopio, se notó un remplazamiento total de los feldespatos por granos de muscovita de hasta 5 mm, con preservación del cuarzo y del apatito magmático, y con presencia excepcional de turmalina. Lateralmente esta alteración pasa a unos halos de sericita y clorita poco desarrollados en los granitos encajonantes, alteración que afecta también a las diferentes facies de granito en casi todo el macizo, aunque de manera muy débil. No se observaron cristales de casiterita, wolframita o de sulfuros en el greisen.

7. Geoquímica

Todas las facies ígneas presentan un índice de aluminosidad (A/CNK; Shand 1927) >1.1 (A/CNK: 1.16-1.29, Fig. 1 y Tabla 1) sugiriendo que son granitos fuertemente peraluminosos de tipo S (Chappell y White, 1974; Sylvester, 1998). Este carácter fuertemente peraluminoso se traduce por la presencia de muscovita y de trazas de granate en los granitos tanto como en las aplitas y pegmatitas.

La disminución del contenido de TiO_2 y los ratios Nb/Ta, Zr/Hf, K/Rb, así como el incremento de la ratio Rb/Sr desde los granitos de dos micas hacia el granito de turmalina-muscovita y las aplitas (Tabla 1), son indicadores de una creciente diferenciación magmática. En el greisen, los ratios Nb/Ta y Zr/Hf son muy similares a los granitos de dos micas ya que son elementos inmóviles poco afectados por la alteración hidrotermal. Sin embargo, hay variaciones notorias en los ratios Rb/Sr y K/Rb en el greisen debido a la destrucción de los feldespatos remplazados por muscovita.

Las concentraciones de Sn son relativamente constantes, de una facie granítica a otra (10 a 15 ppm) y disminuyen en las aplitas (7 a 8 ppm). Es el greisen que presenta la mayor concentración de Sn de todos (31 ppm), lo cual indica un proceso de concentración durante la fase hidrotermal.

7. Discusión y conclusión

En el granito de Paita, las facies las más antiguas contienen dos micas y presentan una transición hacia una facie tardía de granito de turmalina-muscovita. Esta evolución corresponde a un proceso de cristalización fraccionada de biotita y muscovita causando una reducción del contenido de TiO_2 y del ratio Nb/Ta (Stepanov et al., 2014). La reducción drástica del TiO_2 permitió la cristalización de la turmalina en lugar de la biotita, siendo el TiO_2 un inhibidor de su cristalización (Nabelek, 2019). Los resultados de estos mismos parámetros, junto con los ratios Zr/Hf, K/Rb y Rb/Sr, indican una diferenciación aún más importante en los diques aplíticos.

Los valores de Sn registrados en los granitos son muy superiores al valor promedio de la corteza continental superior (2.1 ppm, Rudnick y Gao, 2004) y equivalentes a las concentraciones de fondo encontradas en granitos relacionados a sistemas estanníferos como los granitos del Batolito Cornubiano en Gran Bretaña (Charoy, 1986; Manning y Hill, 1990) o el granito de San Rafael en Perú (Clark et al., 1990).

No se notó una correlación positiva entre las concentraciones de Sn y el grado de diferenciación entre las diferentes facies encontradas, siendo el Sn constante e invariante entre las facies graníticas, apreciándose incluso una reducción en las aplitas. Esta evolución es compatible con un control de las micas en las concentraciones de Sn en magmas subsaturados con respecto a la casiterita (Lehmann, 1990). La disminución en la abundancia de micas desde las facies graníticas de dos micas hacia las aplitas explicaría así esta evolución. El tungsteno muestra un comportamiento similar al estaño, pero con factores de enriquecimiento menores, con valores de 1 a 3 ppm en granitos y aplitas, alcanzando 5 ppm en el greisen (1 ppm W en la corteza continental superior; Rudnick y Gao, 2004).

El greisen es globalmente contemporáneo a las fases de pegmatita miarolítica y anterior a la formación de los enjambres de diques aloppegmatíticos, indicando fases de cristalización de magma en presencia de fluidos. Como las litologías greisen presentan las mayores concentraciones de Sn, pero sin presencia de casiterita, se infiere que el contenido de Sn es controlado por la muscovita que es un mineral que puede contener hasta varias centenas de ppm de este elemento (e.g. Legros *et al.*, 2018).

A la fecha no se han encontrado minerales como casiterita, wolframita o sulfuros en el granito de Paita. La distribución esparcida del greisen, y la presencia de pegmatitas y aplitas sugiere que en el Macizo de Paita se tiene un sistema profundo y/o las raíces de un sistema fuertemente erosionado. Se requiere entonces análisis de inclusiones fluidas y geoquímica más amplia para evaluar la profundidad de emplazamiento del sistema y evaluar el potencial por estaño, tungsteno y posiblemente metales raros como Nb, Ta y Be.

Agradecimientos

Este aporte es el producto de algunas investigaciones realizadas y en proceso, en el Macizo de Paita, financiadas por el Programa de Apoyo a la Iniciación en la Investigación (PAIN) y el Programa de Apoyo al Desarrollo de Tesis de Licenciatura (PADET) de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Referencias

- Bellido, M., Valverde, P., Jaimes, F., Carlotto, V. y Díaz, E. 2009. Datación y caracterización geoquímica de los granitoides peraluminicos de los cerros de Amotapes y de los macizos de Illescas y Paita (noroeste del Perú). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, v. 103, p. 197-213.
- Blevin, P.L., and Chappell, B.W. 1995. Chemistry, origin, and evolution of mineralized granites in the Lachlan fold belt, Australia: The metallogeny of I- and S-type granites. *Economic Geology*, v. 90, p. 1604-1619.
- Caldas, J., Palacios, O., Pecho, V. y Vela, C. 1980. Geología de los cuadrángulos de: Bayovar, Sechura, La Redonda, Pta. La Negra, Lobos de Tierra, Las Salinas y Morrope. *Boletín N° 32. Serie A: Carta Geológica Nacional. INGEMMET. Perú.*
- Černý, P., Blevin, P.L., Cuney, M., London, D. 2005. Granite-related ore deposits. *Society of Economic Geologists, 100th Anniversary*, p.337-370.
- Chappell, B.W. y White, A.J.R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology, Circum-Pacific Plutonism*, 8, p. 173-174.
- Charoy, B. 1986. The genesis of the Cornubian batholith (southwest England): the example of the Carnmenellis pluton. *Journal of Petrology*, v. 27, p. 571-604.
- Clark, A.H., Farrar, E., Kontak, D.J., Langridge, R.J., Arenas, M.J., France, L.J., McBride, S.L., Woodman, P.L., Wasteneys, H.A., Sandeman, H.A., Archibald, D.A. 1990. Geologic and geochronologic constraints on the metallogenic evolution of the Andes of southeastern Peru. *Economic Geology*, v. 85, p. 1520-1583.
- Espinoza, A. y Stipetich, S. 2019. Análisis Mineralógico, Petrológico y Geoquímico de los Afloramientos Ígneos y Metamórficos del Macizo de Paita: Eventos, Facies Metamórficas y Magmatismo. Informe de Programa de Apoyo a la Iniciación en la Investigación (PAIN). Repositorio Institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Lehmann, B. 1990. *Metallogeny of Tin*. Springer Berlin Heidelberg, 212 p.
- Legros, H., Marignac, C., Tabary, T., Mercadier, J., Richard, A., Cuney, M., Wang, R., Charles, N., y Lespinasse, M.Y. 2018. The ore-forming magmatic-hydrothermal system of the Piaotang W-Sn deposit (Jiangxi, China) as seen from Li-mica geochemistry. *American Mineralogist*, v. 103, p. 39-54.
- Manning, D. A., y Hill, P. I. 1990. The petrogenetic and metallogenic significance of topaz granite from the southwest England ore field. *Geological Society of America Special Paper*, v. 246, p. 51-69.
- Nabelek, P. 2019. Petrogenesis of leucogranites in collisional orogens. *Geological Society, London, Special Publications*, 491, p. 179-207
- Rudnick, R. L. y Gao, S. 2004. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, v. 3, p. 1-64.
- Palacios, O. 1994. Geología de los cuadrángulos de Paita, Piura, Talara, Sullana, Lobitos, Quebrada Seca, Zorritos, Tumbes y Zarumilla. *Boletín N° 54. Serie A. Carta Geológica Nacional. INGEMMET, Perú.*
- Sánchez, J., Palacios, O., Feininger, T., Carlotto, V. y Quispesivana, L. 2006. Puesta en evidencia de granitoides triásicos en Los Amotapes-Tahuín: Deflexión de Huancabamba. XIII Congreso Peruano de Geología, Resúmenes extendidos, Publicación Especial, v. 7, p. 312-315.
- Shand, S.J. 1927. *Eruptive Rocks Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-deposits with a Chapter on Meteorites*. 1st Edition, Thomas Murby and Company, London, England.
- Stepanov, A., Mavrogenes, J.A., Meffre, S. y Davidson, P. 2014. The key role of mica during igneous concentration of tantalum. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 167, p. 1009.
- Sylvester, P.J., 1998. Postcollisional strongly peraluminous granites, *Lithos*, v. 45, p. 29-44.

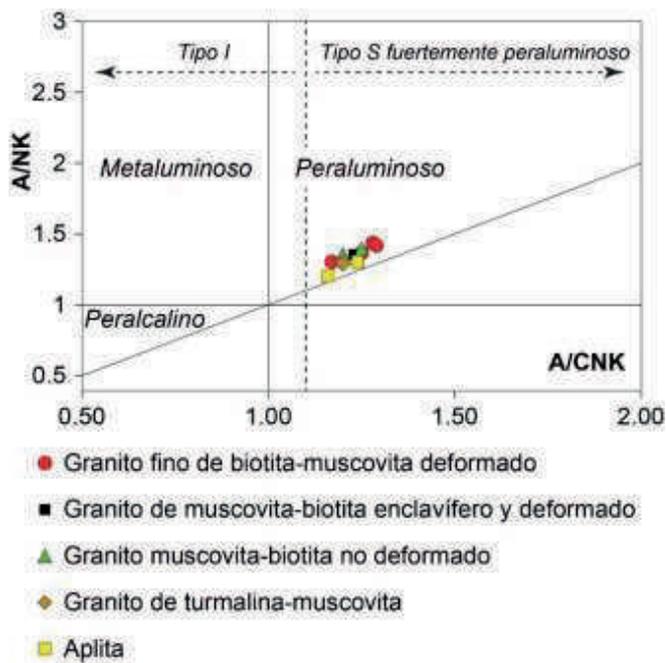


Figura 1. Diagrama de saturación de alúmina de Shand (1927), con la ubicación del límite entre granitoides de tipo I y granitos fuertemente peraluminosos de tipo S según Chappell y White (1974) y Sylvester (1998). Índices de saturación de alúmina (relaciones molares):
 $A/NK = Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$; $A/CNK = Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$

Tabla 1: Análisis geoquímicos y relaciones molares de índice de saturación en alúmina de Shand (1927) para los granitos, aplitas y greisen del Granito de Paita. NA: no analizado.

| Referencia | Litología | A/NK | A/CNK | Nb/Ta | Zr/Hf | K/Rb | Rb/Sr | TiO ₂ % peso | Sn ppm | W ppm |
|-----------------------------|--|------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------------|-----------|----------|
| Espinoza y Stipetich (2019) | Granito fino de biotita-muscovita deformado | 1.30 | 1.17 | 7.70 | 30.8 | 148.2 | 4.25 | 0.17 | 10 | 3 |
| | | 1.37 | 1.25 | 7.77 | 30.4 | 147.6 | 4.65 | 0.17 | 10 | 3 |
| | | 1.44 | 1.28 | 8.15 | 31.9 | 143.9 | 4.24 | 0.23 | 10 | 2 |
| Bellido et al. (2009) | | 1.42 | 1.29 | 9.93 | 33.0 | 142.5 | 3.87 | 0.17 | 14 | NA |
| Presente Trabajo | Granito de muscovita-biotita enclavifero y deformado | 1.36 | 1.23 | 7.05 | 26.5 | 138.5 | 4.60 | 0.14 | 15 | 3 |
| | Granito de muscovita-biotita no deformado | 1.36 | 1.20 | 9.47 | 28.3 | 158.4 | 3.49 | 0.19 | 9 | 2 |
| | | 1.40 | 1.25 | 7.21 | 29.6 | 157.7 | 3.85 | 0.16 | 13 | 1 |
| | Granito de turmalina-muscovita | 1.29 | 1.20 | 5.86 | 23.6 | 129.7 | 7.30 | 0.06 | 13 | 3 |
| | Aplita | 1.31 | 1.24 | 2.08 | 16.7 | 108.1 | 11.03 | 0.04 | 7 | 2 |
| | | 1.20 | 1.16 | 2.14 | 13.8 | 87.1 | 15.42 | 0.01 | 8 | 2 |
| Greisen | - | - | 6.66 | 27.8 | 104.0 | 78.10 | 0.13 | 31 | 5 | |