

El metamorfismo de contacto asociado al granito de Ponferrada

Zona Asturoccidental-leonesa, NO de España

Luis González-Menéndez¹, Pablo González Cuadra¹, Silvia Menéndez², Pablo Caldevilla³, Alba Lozano⁴

1) Unidad Territorial del IGME-CSIC en León

2) IGME-CSIC. Museo Geominero

3) Área de Prospección e Investigación Minera, E.S.T.I. Minas, Universidad de León

4) Área de Didáctica Ciencias Experimentales, Facultad de Educación, Universidad de León

El granito de Ponferrada (≈ 295 - 287 Ma; Suárez, 1970; Fernández Suárez, 1994, 2000; Gutiérrez Alonso *et al.*, 2011; Caldevilla, 2023; González-Menéndez *et al.*, 2026) y sus rocas paleozoicas adyacentes, afloran en la comarca del Bierzo, al noreste de Ponferrada (Fig. 1). Las rocas paleozoicas de esta región (≈ 500 - 440 Ma) y sus estructuras tectónicas definen la Zona Asturoccidental-leonesa, una de las unidades geológicas de la cordillera Varisca, desarrollada durante el Paleozoico superior (≈ 350 - 300 Ma). Posteriormente, esta cordillera fue erosionada y parcialmente reactivada durante la etapa Alpina (≈ 50 - 33 Ma). En estos contextos orogénicos, es frecuente la formación de granitos que proceden de magmas ricos en sílice formados a cierta profundidad en la corteza, que ascienden, se emplazan y finalmente cristalizan en niveles corticales más superficiales. La erosión y/o la actividad tectónica posteriores favorecen su exhumación y afloramiento en superficie. Durante el emplazamiento y la cristalización de los magmas graníticos, parte de su energía térmica ($\approx 700^\circ\text{C}$) se transfiere a las rocas encajantes, generalmente más frías (< 200 - 300°C), produciendo metamorfismo de contacto. Asimismo, durante la cristalización, los magmas liberan fundidos y fluidos residuales enriquecidos en H_2O y diversos elementos (p. ej. SiO_2 , K_2O , B, Sn, W, U), pudiendo dar lugar a mineralizaciones de interés económico.

El metamorfismo de contacto

Este metamorfismo, también denominado “térmico”, consiste en la transformación textural y mineralógica ($\pm$ química) de una roca original, debida al calor transferido por un magma intrusivo a presión constante. Cuando, además, hay cambios importantes a nivel químico, el proceso se puede denominar “metasomatismo”. Las transformaciones texturales suelen ser de tipo granoblástico, con formación de nuevos cristales (blastos) no orientados en ausencia de deformaciones tectónicas. Las reacciones metamórficas consisten en la deshidratación de minerales hidratados (filosilicatos: arcillas-micas) y recrystalizaciones en los minerales anhidros (cuarzo-feldespatos).

Los fluidos ricos en H_2O liberados en estas reacciones de deshidratación se escapan e intruyen en la sucesión de rocas suprayacentes hasta enfriar y solidificar como venas de cuarzo. Cuando las rocas originales contienen materia orgánica y/o carbonatos, las reacciones metamórficas liberan gases, CH_4 y CO_2 , que pueden tener un efecto en el clima si las cantidades son importantes (Aarnes *et al.*, 2010).

Las reacciones de deshidratación también suelen generar minerales metamórficos menos hidratados o anhidros (clorita, biotita, andalucita, cordierita, feldespatos, etc.). Algunos de estos minerales se denominan clásicamente “minerales índice” cuando representan condiciones muy específicas de presión y temperatura en las que se forman y son estables. Las rocas generadas durante este tipo de metamorfismo se suelen denominar corneanas o cornubianitas.

El metamorfismo de contacto en el granito de Ponferrada

El granito de Ponferrada (Fig. 1) tiene una química peraluminosa: rica en aluminio respecto a otros componentes (Ca, Na, K) y una mineralogía formada por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y moscovita. Con bastante menor abundancia aparecen también cordierita, granate y turmalina. De forma accesoria encontramos fases como apatito, circón, monacita, dumortierita (un silicato de boro), ilmenita y sulfuros. La temperatura de este tipo de granitos peraluminosos suele estar en torno a 650-700°C durante su etapa final de cristalización (estimada mediante la temperatura de saturación del zircón). Su presión o profundidad de emplazamiento se estima bastante somera, en torno a los 1,5-2 kbar ($\sim$ 4-6 km de profundidad), estimada mediante diagramas de fases de presión-temperatura.

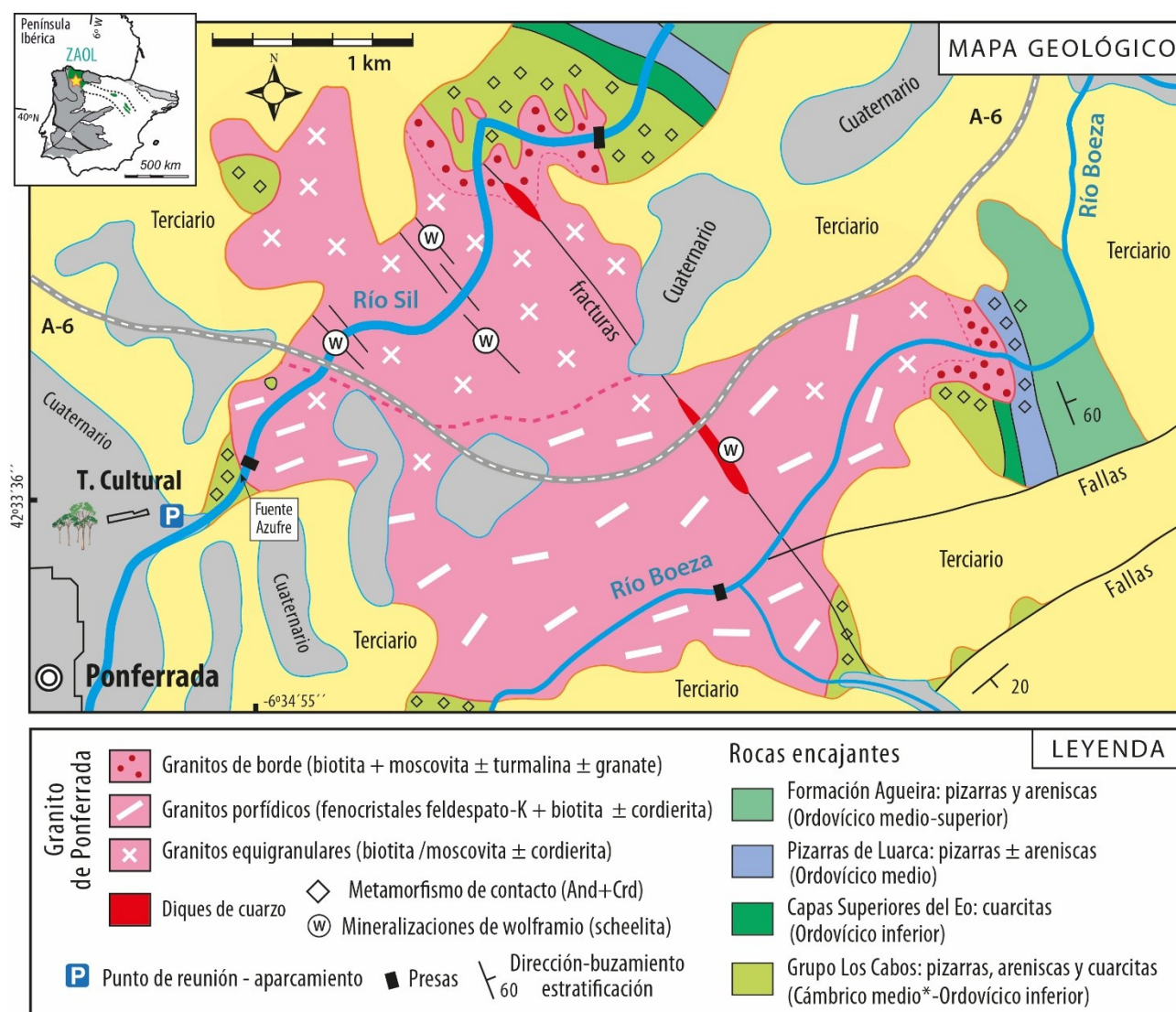


Figura 1. Mapa geológico simplificado del granito de Ponferrada y su entorno. Basado en Suárez (1970), Fernández Suárez (1994) y en datos propios. La situación de la zona de estudio es adyacente a la Térmica Cultural. ZAOL: Zona Asturoccidental-leonesa. *Cámbrico medio = Cámbrico Miaolingiense.

Las rocas encajantes del granito de Ponferrada pertenecen mayoritariamente al Grupo Los Cabos y constituyen una alternancia de metareniscas, cuarcitas y pizarras depositadas durante el Cámbrico Miaolingiense-Ordovícico Inferior en una plataforma continental marina (Figs. 1 y 2). Su composición original consiste principalmente en cuarzo y cantidades variables de filosilicatos (arcillas-sericita-clorita) y feldespatos (plagioclase albítica).

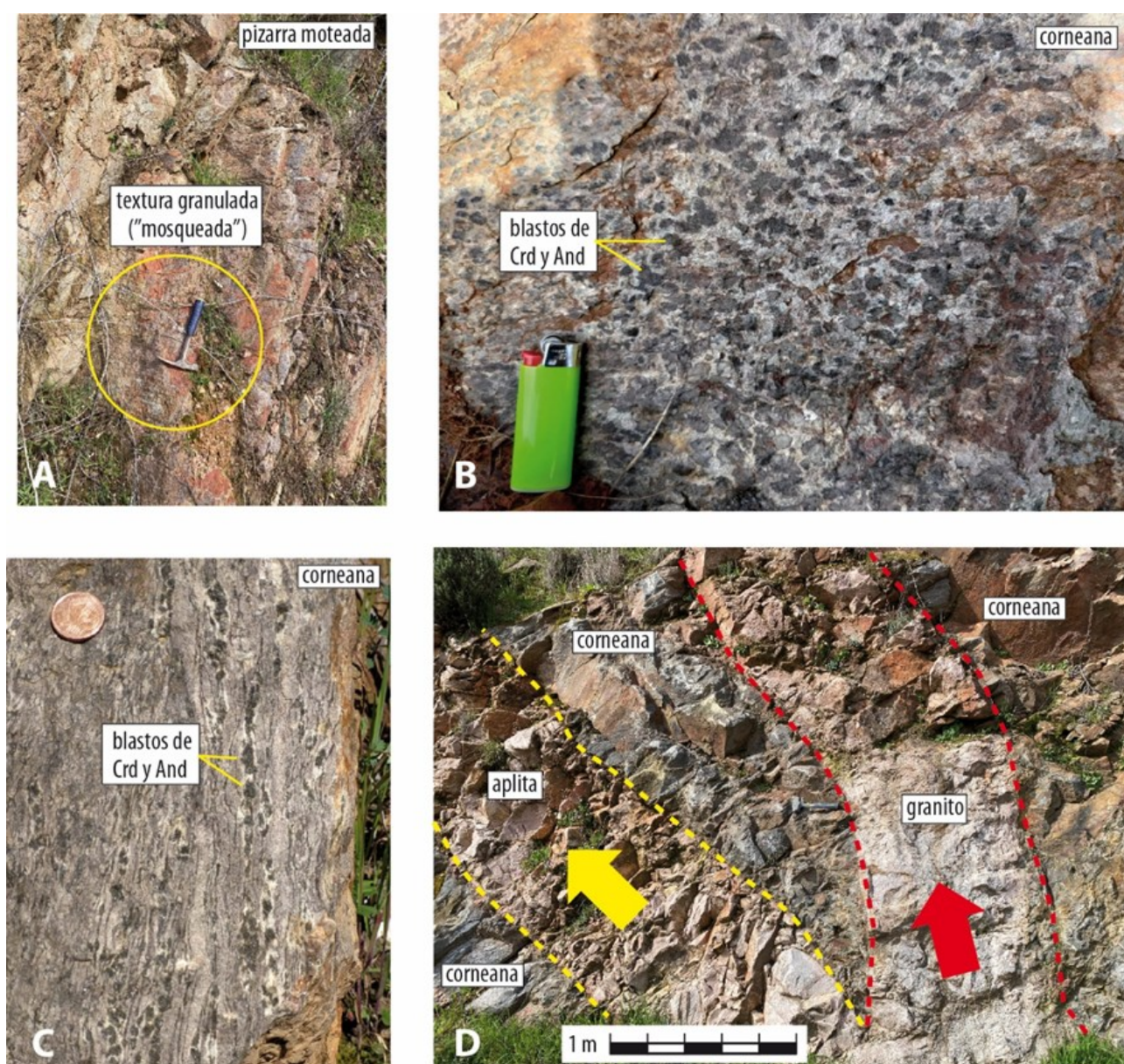


Figura 2. Aspecto de afloramiento de las rocas de metamorfismo de contacto del granito de Ponferrada. A) Texturas moteadas en capas de pizarras. B y C) Blastos de andalucita (And) y cordierita (Crd). Las zonas más claras envolviendo a los blastos consisten principalmente en cuarzo + plagioclasa ($\pm$ biotita $\pm$ moscovita $\pm$ clorita). La disposición laminada es en parte heredada de la roca sedimentaria original y en parte acentuada por el metamorfismo. D) Intrusión de diques aplíticos y graníticos en las corneanas, en las zonas próximas al contacto con el granito.

Estas rocas fueron posteriormente deformadas por esfuerzos tectónicos y afectadas a escala regional por un metamorfismo varisco producido por el aumento de presión y temperatura asociado al engrosamiento cortical del orógeno Varisco ($\sim 350\text{-}300$ Ma). Este metamorfismo regional alcanzó temperaturas de $\sim 300\text{-}400^\circ\text{C}$ en este entorno y generó principalmente clorita $\pm$ biotita, minerales producidos por reacciones de deshidratación de los filosilicatos previos (Fernández Suárez, 1994). La presión se estima que no fue mayor de 2-3 kbar dada la ausencia de minerales índice característicos (p. ej. estauroлита, granate).

Unos 25-33 millones de años después, durante el emplazamiento del granito de Ponferrada y a escala local, la temperatura de las rocas encajantes volvió a aumentar debido al calor transferido por el magma granítico. Este episodio de metamorfismo de contacto dejó una marcada impronta en las zonas adyacentes al granito que se puede ahora reconocer en las texturas de recrystalización (granuladas, moteadas o mosqueadas; Fig. 2) y en la presencia de minerales índice como biotita, y, sobre todo,

blastos de andalucita y cordierita (Fig. 3). Debido a una considerable retrogradación posterior (alteración con H₂O), la andalucita y cordierita fueron parcial o totalmente reemplazadas por una asociación de biotita, moscovita y clorita $\pm$ cuarzo. Son frecuentes los cristales de biotita ($\pm$ moscovita) formando coronas. En muchos casos, solo se preservan las formas externas originales de los cristales de andalucita y cordierita (“pseudomorfos”).

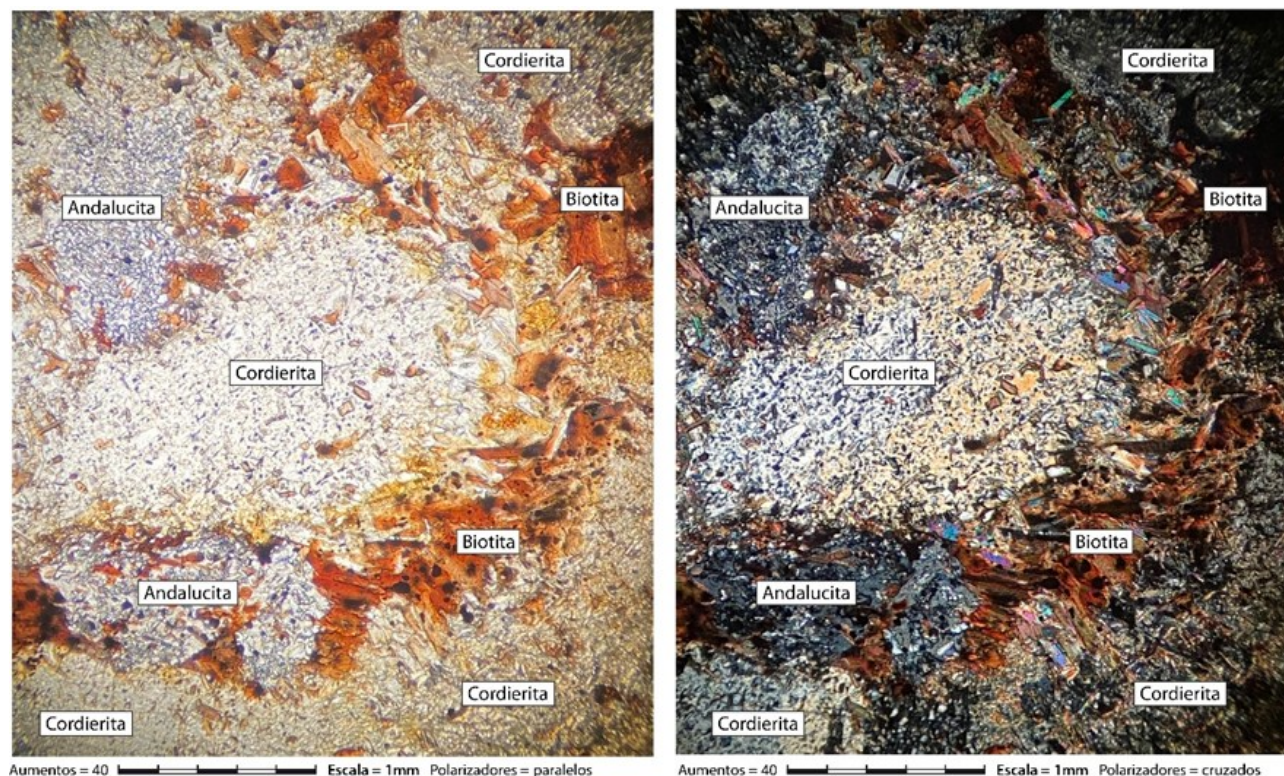


Figura 3. Fotomicrografía de los blastos de andalucita y cordierita de las corneanas en el contacto de la presa de Bárcena, al norte del granito, donde algunos minerales se preservan con menor alteración/retrogradación. Cabe destacar la corona de biotita $\pm$ moscovita desarrollada en los bordes de los blastos.

Modelización

Para estudiar cómo fue el proceso de metamorfismo de contacto realizamos un modelo termodinámico donde, tomando una composición lo más similar posible a la de las rocas encajantes, aumentamos la temperatura a presión constante (1,5 kbar). Bajo estas condiciones y mediante las propiedades termodinámicas de los minerales podemos calcular cuáles son las reacciones que se producen y los rangos de estabilidad de los diferentes minerales. Los resultados preliminares que se muestran en la Fig. 4 indican la formación y/o desestabilización de los minerales compatibles con la composición de la roca modelada para un rango de temperaturas entre los 550 y 700°C. Entre los aspectos más destacables está la secuencia teórica de minerales índice que correspondería, al aumentar la temperatura (y al aproximarse al granito como fuente de calor), con moscovita-biotita $\rightarrow$ andalucita $\rightarrow$ cordierita (+ plagioclasa + feldespato potásico). Se observa cómo las fases más abundantes serían, a partir de los 600-620°C, la cordierita y plagioclasa, y que, teóricamente, serían los minerales predominantes en las corneanas más próximas al granito.

Las diferentes reacciones para formar todos estos minerales se muestran en la Fig. 5, y, como se puede ver, estas reacciones liberan H₂O que posteriormente generará venas de cuarzo. Además, algunos de estos minerales como la moscovita y biotita pueden contener como elementos traza elementos de interés económico (denominados en la actualidad “elementos críticos”) como, por ejemplo, Sn y W. Estos elementos suelen tener preferencia físico-química por los fluidos liberados durante estas reacciones de deshidratación y por lo tanto pueden concentrarse en ellos y generar mineralizaciones en las venas de cuarzo derivadas (Caldevilla *et al.*, en prensa).

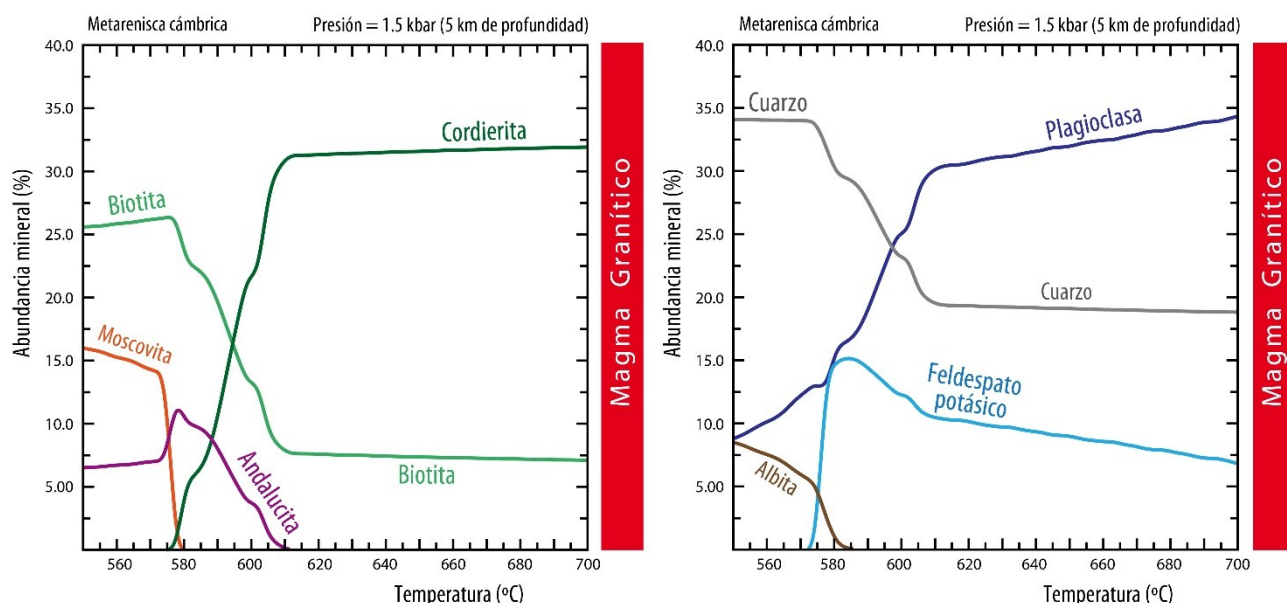


Figura 4. Modelo termodinámico donde se muestra la evolución teórica de los diferentes minerales que se van estabilizando/desestabilizando y su abundancia modal a medida que aumenta la temperatura o la proximidad al foco de calor: el magma granítico.

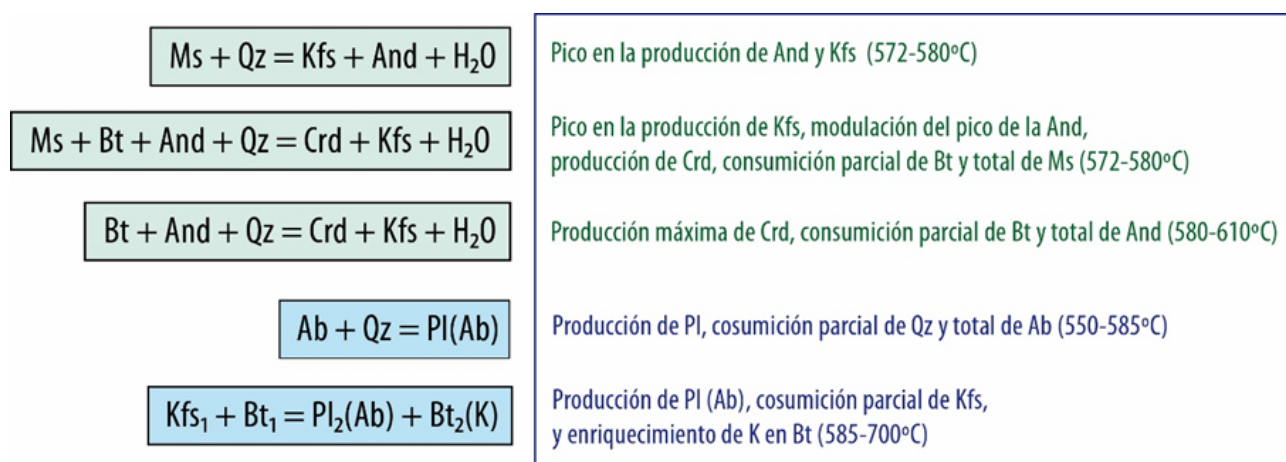


Figura 5. Reacciones mineralógicas aproximadas referidas al modelo de la Fig. 4. En color/texto verde, reacciones que afectan/producen principalmente minerales índice. En color/texto azul reacciones que afectan a tectosilicatos. Las abreviaturas son And: andalusita, Bt: biotita, Crd: cordierita, Kfs: feldespato potásico, Ms: moscovita, Pl: plagioclasa, Ab: albita, Qz: cuarzo.

La correspondencia del modelo con las observaciones es destacable en la mayor abundancia de cordierita frente a andalusita, como se puede apreciar en la fotomicrografía (Fig. 3). Aunque las relaciones texturales no son claras respecto al orden de cristalización, algunas andalucitas parecen estar parcialmente incluidas en cordieritas, lo que respaldaría una cristalización inicial de andalusita seguida de cordierita, como predice el modelo para el rango de temperaturas estudiado. No obstante, la retrogradación posterior complica las observaciones. Con respecto a los feldespatos, especialmente el feldespato potásico, estos han sido alterados a sericita (micas) y no se pueden establecer claramente sus relaciones texturales.

La Fuente del Azufre

La fuente del azufre consiste en un manantial de agua termal actual, ubicado geológicamente en el contacto entre el granito de Ponferrada y su roca encajante metamórfica, con una temperatura en torno a los 20°C, un fuerte olor a huevos podridos (por la emisión de gas SO_2) y desarrollo local de una

comunidad microbiana (¿algas y sulfobacterias?). Aunque el origen de esta emanación se relacionó en ocasiones con procesos volcánicos, dada la total ausencia de este tipo de fenómenos en la actualidad y en esta zona (y en todo el noroeste peninsular), es necesario buscar otras explicaciones alternativas.

La existencia de SO_2 implica en realidad que el agua subterránea que llega al manantial transporta sulfuro de hidrógeno disuelto (H_2S), que al llegar a superficie se libera como gas y reacciona con el oxígeno de la atmosfera produciendo el gas SO_2 y el olor característico. ¿Cómo adquiere entonces el agua el sulfuro de hidrógeno? Si no existe una fuente volcánica que lo esté aportando, una posibilidad es que, en profundidad, el agua subterránea (de origen meteórico), en condiciones pobres en oxígeno y en un medio ácido, interaccione con zonas de mineralizaciones de sulfuros (p. ej. pirita: FeS_2). Para estudiar este proceso realizamos un modelo termodinámico que muestra cómo, bajo estas condiciones, la pirita puede formar sulfuro de hidrógeno y hierro en disolución (Fe^{2+}) que se incorporan al agua subterránea (Fig. 6). Cuando esta agua asciende de forma rápida (y metaestable) hasta la surgencia, puede transportar estos componentes a la superficie, donde el H_2S se oxida a SO_2 y el Fe^{2+} se diluye en el caudal del río Sil para oxidarse a Fe^{3+} y precipitar diferentes minerales de hierro (oxihidróxidos como la goethita: $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$ y la ferrihidrita: $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, y el oxihidroxisulfato schwertmannita: $\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; Nordstrom y Alpers, 1999).

La comunidad microbiana puede beneficiarse y/o catalizar la energía liberada en la oxidación del sulfuro de hidrógeno, así como también beneficiarse de la posible producción local de materia orgánica ligada a la interacción del H_2S con el $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ atmosférico.

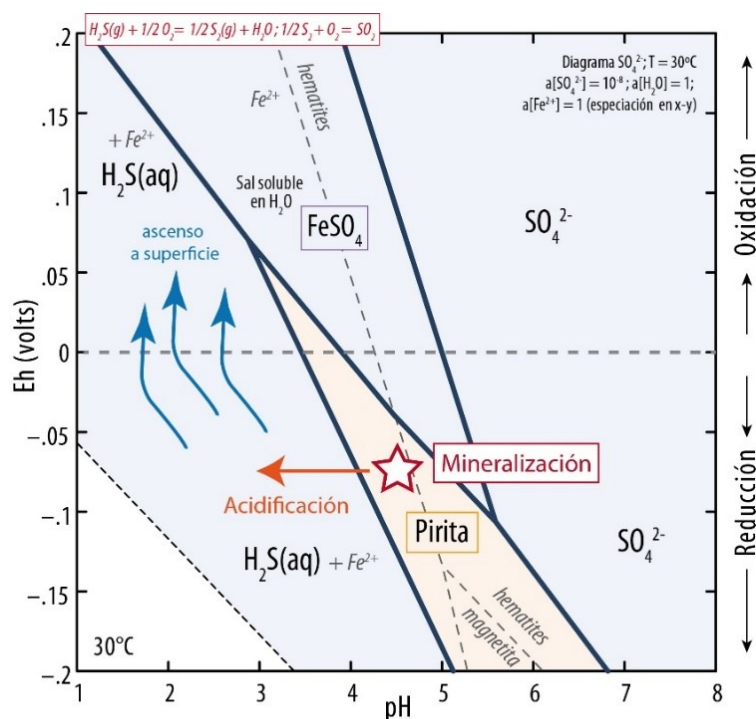


Figura 6. Diagrama Eh (oxidación-reducción) frente al pH (acidez) o diagrama de Pourbaix. Los parámetros establecidos para el cálculo de las reacciones se muestran en la parte superior derecha de la figura. En estas condiciones, las mineralizaciones de sulfuros (p. ej. pirita) pueden ser estables bajo condiciones reductoras (pobres en oxígeno) y neutras o moderadamente ácidas. En contacto con aguas más ácidas estos sulfuros se desestabilizan dando $\text{H}_2\text{S}(\text{aq}) + \text{Fe}^{2+}$ en solución. El ascenso rápido de estos fluidos puede generar surgencias con emanaciones sulfurosas.

Bibliografía

- Aarnes, I., Svensen, H., Connolly, J.A.D. y Podlachikov, Y.Y. (2010). How contact metamorphism can trigger global climate changes: modeling gas generation around igneous sills in sedimentary basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 (24), 7179-7195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.09.011>
- Caldevilla, P. (2023). *Geología y metalogenia de los yacimientos de W-Sn y Au en el noroeste de la Península Ibérica: Peña do Seo (Zona Asturoccidental-Leonesa) y Sinclinal de Truchas (Zona Centroibérica)*. Tesis Doctoral, Universidad de León, 161 pp. DOI: <https://doi.org/10.18002/10612/17373>
- Caldevilla, P., González-Menéndez, L., Lozano, A., Castañón, A.M. y Gómez-Fernández, F. (en prensa). Muscovite as a tracer of magmatic–hydrothermal evolution and rapid cooling in granite-related W–Sn systems, NW Iberia. *Mineralium Deposita*.
- Fernández-Suárez, J. (1994). *Petrología de los granitos peralumínicos y metamorfismo de la banda Boal-Los Ancares*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 418 pp.
- Fernández-Suárez, J., Dunning, G.R., Jenner, G.A. y Gutiérrez-Alonso, G. (2000). Variscan collisional magmatism and deformation in NW Iberia: constraints from U-Pb geochronology and granitoids. *Journal of the Geological Society of London*, 157, 565-576. DOI: <https://doi.org/10.1144/jgs.157.3.56>
- González-Menéndez, L., Gallastegui, G., Cuesta, A., Montero, P., Bea, F., Valverde-Vaquero, P., Díez Fernández, R., Rubio-Ordóñez, A. y González Cuadra, P. (2026). Variscan granitoid magmatism in NW Iberia (Europe): Age and nature of the melting events and implications for continental orogenic evolution. *GSA Bulletin*, 138 (5/6), 2710-2732. DOI: <https://doi.org/10.1130/B38296.1>
- Gutiérrez-Alonso, G., Fernández-Suárez, J., Jeffries, T.E., Johnston, S.T., Pastor-Galán, D., Murphy, J.B., Franco, M.P. y Gonzalo, J.C. (2011). Diachronous post-orogenic magmatism within a developing orocline in Iberia, European Variscides. *Tectonics*, 30 (5), TC5008, 1-17. <https://doi.org/10.1029/2010TC002845>
- Nordstrom, D.K. y Alpers, C.N. (1999). Geochemistry of Acid Mine Waters. En: *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits: Part A: Processes, Techniques, and Health Issues. Part B: Case Studies and Research Topics* (Plumlee, G.S., Logsdon, M.J., Filipek, L.F., eds.), 133-160. DOI: <https://doi.org/10.5382/Rev.06.06>
- Suárez, O. (1970). Los granitos de Ponferrada (León). *Boletín Geológico y Minero*, 81 (2-3), 185-191.

Programas utilizados en los cálculos termodinámicos

- Metamorfismo de contacto: *Perple_X*: Connolly, J.A.D. y Petrini, K. (2002). An automated strategy for calculation of phase diagram sections and retrieval of rock properties as a function of physical conditions. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 697-708. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2002.00398.x>
- Fuente del Azufre: *GWB*: Bethke, C.M., Farrell, B. y Sharifi, M. (2025). *The Geochemist's Workbench®, Release 18: GWB Essentials Guide*. Aqueous Solutions LLC, Champaign, IL, 238 pp.

Para citar este artículo:

González-Menéndez, L., González Cuadra, P., Menéndez, S., Caldevilla, P. y Lozano, A. (2026). El metamorfismo de contacto asociado al granito de Ponferrada. Zona Asturoccidental-leonesa, NO de España. *GeoLaciana 2026*, artículo 6.