

Conferencia Invitada

CONSIDERACIONES SOBRE EL ROL DE LAS FRACTURAS O FALLAS EN EL ORIGEN Y EMPLAZAMIENTO DE LOS MAGMAS.

ON THE ROLE OF FRACTURES OR FAULTS IN THE ORIGIN AND EMPLACEMENT OF MAGMAS.

MIGUEL A. PARADA

Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21. Santiago.

INTRODUCCION

En esta presentación, solicitada por el Presidente del Comité Coordinador del Primer Coloquio Nacional de Megafallas (contribución al Proyecto 202 del PICG: Megafallas de Sud América), se expondrán algunas reflexiones e ideas recogidas de la literatura y de la propia experiencia del autor, con respecto al rol de las fracturas o fallas en los procesos de génesis y emplazamiento de los magmas. Aunque estos aspectos no tienen una directa relación con el tema específico del Proyecto Megafallas de América del Sur, su conocimiento puede proporcionar algunas bases para inferir, de una manera más completa, la participación de las fracturas o fallas en la historia geológica de una región.

Debido a que el autor se dedica fundamentalmente a las rocas graníticas, la mayor parte de las ideas vertidas más adelante están ligadas con el plutonismo félsico, especialmente en lo que a emplazamiento se refiere.

EL ROL DE LAS FRACTURAS EN LA FUSION

Consideraciones previas sobre el proceso de fusión: Para entender mejor el proceso de fusión asociado a fallas, es necesario tener presente algunas consideraciones termodinámicas simples relacionadas con la ausencia o presencia de volátiles en dicho proceso. Cualquier curva de equilibrio en un diagrama P-T, limitan campos de estabilidad de asociaciones con diferentes volúmenes modales en que el signo de la pendiente de la curva indicará si el aumento de la temperatura favorece la formación de una asociación de mayor o menor densidad. De la expresión de Clapeyron $dP/dT = \Delta H/T \Delta V$, se desprende que la disminución o aumento del volumen con la fusión determinará si la pendiente es negativa o positiva respectivamente.

La fusión de cualquier sistema silicatado deficiente en volátiles produce un aumento de volumen, por consiguiente su curva de fusión tendrá pendiente positiva (curvas A y B, Fig. 1). Sin embargo, si se agrega H₂O al sistema sujeto a fusión hasta dejar al líquido en condiciones de máxima solubilidad o de saturación, se produce a presiones mo-

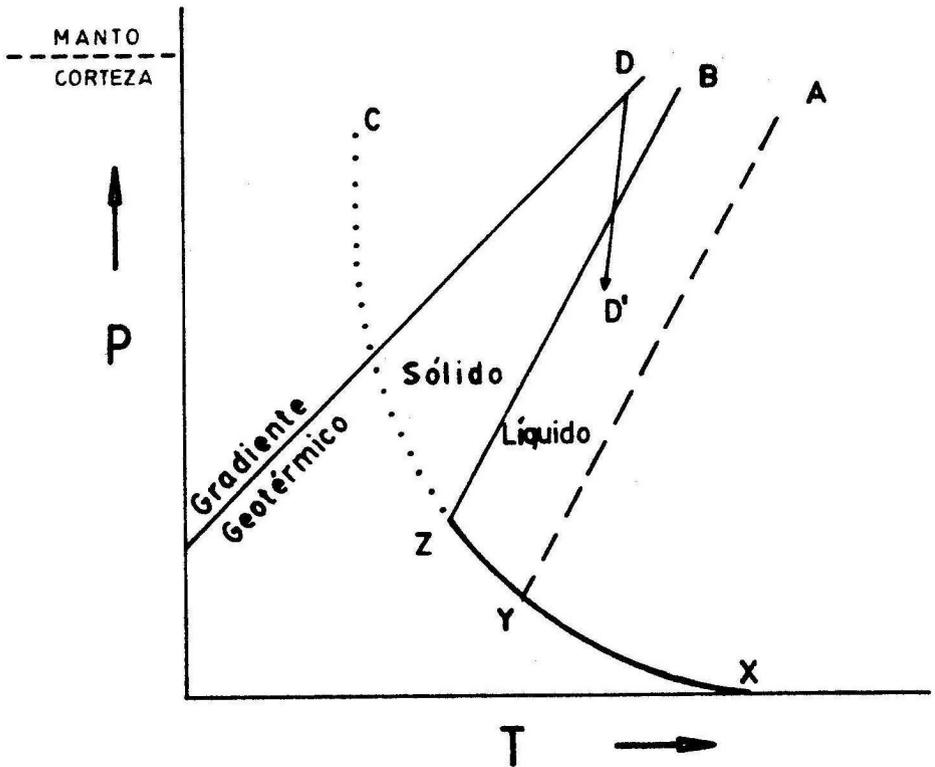


Fig. 1. Diagrama P-T esquemático para mostrar la factibilidad de generación de magma granítico por descompresión via falla de la corteza inferior deficiente en H₂O. La curva XYA representa la curva de comienzo de fusión de la corteza con un contenido inicial pobre de H₂O. La curva XZB representa la curva de comienzo de fusión de la corteza después de la colección de H₂O producido por la falla, pero aún en condiciones de subsaturación. La curva XC representa la fusión mínima del granito saturado en H₂O. Nótese que la descompresión y simultánea acumulación de H₂O provocada por una falla que afecta a una porción de corteza en las condiciones D, puede provocar su fusión bajo las nuevas condiciones D' (D-D' representa el enfriamiento adiabático del H₂O).

deradas, un reacción de fusión con disminución de volumen (curva de fusión con pendiente negativa: curva C, Fig. 1), puesto que el agua ocupa mayor espacio como fase independiente que cuando está disuelta en el fundido: cristales + vapor \rightleftharpoons líquido; $V_L - (V_{\text{crist}} + V_{\text{H}_2\text{O}}) < 0$. Esta diferencia en volumen tiende a disminuir hacia las altas P_{H₂O} debido a que el volumen molal del H₂O también disminuye con la presión.

Por otra parte, la adición de cualquier componente a un sistema produce una disminución de la temperatura de fusión. En el caso de adición de H₂O, dicha disminución es particularmente importante, puesto que sus características dipolares favorece el rompimiento de las estructuras de los silicatos.

Para una mejor comprensión sobre los procesos de fusión anhidra e hidratada, el lector podrá remitirse, entre otros, a Tuttle y Brown (1958); Fyfe (1970); Fyfe et al. (1978). Bailey (1976). Burnham (1967; 1979).

Las fracturas y la fusión: Lo más razonable, desde el punto de vista geológico, es considerar que la fusión ocurre en condiciones de subsaturación de volátiles puesto que, tanto la corteza inferior, formada por rocas de alto grado metamórfico, como el manto superior peridotítico son reconocidamente pobres en volátiles. En estas condiciones el gradiente geotérmico no intersecta la curva de fusión anhidra, por consiguiente la fusión cortical o del manto superior sólo ocurrirá a profundidades razonables si interviene algún agente perturbador ya sea del gradiente geotérmico y/o del punto de fusión de las rocas.

Si se circunscribe este problema a la generación de magmas graníticos, la alteración del gradiente geotérmico (aumento de la temperatura) da cuenta satisfactoriamente de los batolitos cordilleranos. Por ejemplo, la intrusión de magma de mayor temperatura derivado del manto, desencadena la fusión cortical y favorece la formación de magmas intermedios mediante un proceso de hibridación (cf. Younker y Vogel, 1976; Brown, 1977; Hildreth, 1981). Del mismo modo, el ascenso continuo de magma generado en profundidad puede perturbar importantemente el gradiente geotérmico o incluso fundir parcialmente la roca encajante a lo largo de la ruta seguida hasta alcanzar el emplazamiento final.

Por otra parte, la existencia de plutones de granitos tipo S (Chappell y White, 1974) pone en evidencia que la fusión subsaturada en volátiles podría ocurrir también en la corteza sin la intervención tan destacada de un agente térmico, sino que mediante un mecanismo de reducción de los puntos de fusión de las rocas involucradas (Fig. 1). En este caso la fusión cortical subsaturada en H_2O podría llevarse a cabo con la ayuda de las fracturas profundas vía descompresión, de otro modo, los gradientes geotérmicos comúnmente usados intersectan las curvas de comienzo de fusión del granito subsaturado en H_2O a profundidad que, en la mayoría de los casos, sobrepasan los espesores corticales (Fig. 1).

El fenómeno de descompresión va acompañado de una expansión adiabática de los fluidos circundantes (probablemente se trata de una expansión adiabática a entalpía constante; o expansión de Joule Thompson; cf. Bailey, 1970). La mayor concentración de volátiles en las zonas de menor presión (zona de falla) también se traduce en una disminución de las temperaturas de fusión, de acuerdo a lo explicado en la sección anterior, y por consiguiente, facilita la generación de magma.

El rol de las fracturas en la generación de magmas ha sido particularmente destacado para los magmas alcalinos asociados a rifting, en zonas de desgasificación del manto (cf. op. cit.). Sin embargo, como ejemplo de plutonismo subalcalino cortical causado en parte por fallas y fracturas, se pueden mencionar los stocks de leucogranitos tardihercínicos de la cordillera Frontal. En efecto, antecedentes geológicos y geoquímicos en minerales y en roca total, sugieren un origen relacionado a descompresión vía fallas y fracturas de una corteza deficiente en volátiles y pre-calentada por el magmatismo hercínico principal que le precedió (Parada, en prep.). Las fallas y fracturas, en este caso, se entienden como producto del reajuste isostático después de la acreción de material derivado del manto, propio del magmatismo orogénico (hercínico) principal (Parada *et al.*, 1981).

Este análisis del rol de las fallas en la producción de magmas no puede concluir sin mencionar la influencia que tendría el calor de fricción. El calor de fricción generado en zonas de fallas ha sido descartado, por algunos autores, como causa importante en la producción de magma (e.g. Sibson, 1977). No obstante, se han propuesto modelos genéticos que involucran directamente al calor de fricción como agente generador de magmas (Reitan, 1968 a y b. Nicolas *et al.* 1977; Strong y Hanmer, 1981) e incluso, se ha llegado

a estimar que la fricción provocaría un aumento de temperatura alrededor de 100°C por sobre el gradiente geotérmico de 30°C/Km.

En relación a estas últimas ideas, el autor considera ilustrativo resumir el modelo genético que proponen Strong y Hanmer (1981) para los leucogranitos de la zona de cizalla armoricana meridional de Bretaña. Se basa en que el calor de fricción, junto con la acumulación de volátiles en la zona de falla, promueven la fusión cortical. La fusión fraccionada, en el sentido de Presnall (1969), habría sido el mecanismo operante puesto que en el instante en que se genera una porción suficiente de magma, el calor de fricción disminuye notablemente (el magma actúa como lubricante) deteniéndose la fusión, la cual se reanuda sólo cuando el líquido generado haya sido removido mediante bombeo tectónico.

EL ROL DE LAS FRACTURAS O FALLAS EN EL ASCENSO Y EMPLAZAMIENTO MAGMATICOS

El ascenso magmático desde su fuente de origen hasta el lugar de emplazamiento, está controlado por numerosos factores tales como el contraste de densidad y viscosidad entre el magma y su envoltura, el volumen del magma y las estructuras de la sobrecarga. Los dos primeros factores son, al parecer, fundamentales para explicar el ascenso de los magmas graníticos tal como lo atestiguan algunas bases experimentales (cf. Ramberg, 1970).

No obstante, desde el punto de vista teórico es necesaria la presencia de una pequeña irregularidad en la geometría del sistema fundido-sobrecarga para que se inicie el ascenso magmático desde las profundidades (op. cit.). Tal perturbación geométrica puede ser fácilmente atribuible a las estructuras que pueda presentar la cobertura, entre las cuales las fallas y fracturas nuevamente destacan. Es necesario mencionar que el ascenso magmático en niveles profundos de la corteza es diapírico debido al poco contraste de viscosidad entre el magma y su envoltura dúctil.

Otra de las causas del inicio del alzamiento magmático dice relación con el aumento de la presión que resulta de la expansión volumétrica durante la fusión. Este factor puede ser particularmente importante en los magmas básicos (Rast, 1970), puesto que son tanto o más densos que su cobertura. El aumento de la presión puede ser tal que culmine con la formación de fracturas, las cuales facilitan el ascenso del magma, o con respuesta dúctil de la envoltura.

Cuando la formación de magma granítico ocurre simultáneamente con un proceso de deformación (por ejemplo en terrenos migmatíticos), la migración de los líquidos recién formados se puede anticipar y de esta manera favorecer la acumulación temprana de magma que le permita ascender por sí solo. A este respecto, Compston y Chappell (1979) consideran que en un 20 a 30 % de fusión es un límite razonable para movilización de los magmas graníticos

El ascenso y emplazamiento de magmas en los niveles más altos de la corteza, también pueden estar significativamente controlado por las fallas. Recordemos que dicho ascenso puede ocurrir como diapiro o, más comúnmente, como caldera subsidente. El primero de ellos resulta de una intrusión forzada de un magma con alta viscosidad (poco contraste con respecto a su cobertura rígida) en cambio la caldera subsidente depende fundamentalmente de: a) las fallas y fracturas, puesto que se trata del colapso de un volumen de roca de caja limitado por fallas que sobreyace a una cámara magmática y b) la baja viscosidad del magma, que incide en la poca resistencia al hundimiento de bloques y en la mayor faci-

lidad del magma para migrar a través de fracturas a zonas de menor presión: este es el caso de magma granítico a alta temperatura, rico en volátiles y pobre en fenocristales e inclusiones.

El colapso del techo de una cámara magmática podría ocurrir al menos de dos maneras. En primer término, podría suceder si las dimensiones de la superestructura colgada son lo suficientemente grande para que se produzca el colapso gravitacional y el subsiguiente relleno, por parte del magma, del vacío generado. En este sentido, es necesario recordar lo que Ramberg (1970) menciona respecto a que el peso de los materiales aumenta con el cubo de una dimensión lineal, pero que el esfuerzo de cualquier naturaleza (de tensión, cizalle o comprensión) aumenta sólo con el cuadrado de dicha dimensión lineal, por lo tanto siempre habrá un tamaño máximo más allá del cual se produce el colapso gravitacional.

La otra manera que podría generar calderas de subsidencias se relaciona con la facilidad al escape de los magmas cargados de volátiles. Estos magmas aprovechan fracturas para ser evacuados a niveles más superficiales, reduciendo el volumen de la cámara y permitiendo, en consecuencia, el colapso de la sobrecarga.

La complejidad de este proceso de caldera subsidente queda evidenciado en terreno, entre otras cosas, por la presencia en el plutón de bloques hundidos de la roca de caja, por la forma comúnmente tabular limitada por fallas de los plutones (techos planos y paredes verticales), por la alineación de dichos plutones paralela a la estructura regional y por la presencia de cuerpos de brechas caóticas (tuffisitas) que representan los conductos de evacuación explosiva de una cámara más profunda.

SINTEISIS

Se estima que las fracturas o fallas producen una descompresión que al afectar a la corteza inferior y/o manto superior deficientes en volátiles, promueve la fusión al bajar las temperaturas de fusión de las rocas comprometidas.

Las fracturas o fallas juegan un rol relevante en el ascenso y emplazamiento de los magmas graníticos de alta movilidad, los cuales lo hacen frecuentemente mediante el mecanismo de caldera subsidente

REFERENCIAS

- Bailey, D.K., 1970 Volatile flux, heat focusing and generation of magma. En: Mechanism of Igneous Intrusion (Eds.: G. Newall and N. Rast), 177-186, Gallery Press, Liverpool.
- Bailey, D.K., 1976. Experimental methods and the uses of phase diagrams. En: The Evolution of the crystalline Rocks (Eds.: Bailey, D.K. y Macdonald, R.), 4-97, Academic Press, London.
- Brown, G.L., 1977. Mantle origin of Cordilleran granites. *Nature*, 265: 21-24.
- Burnham, C.W., 1967. Hidrotermal fluids at the magmatic stage. En: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (Ed. H.L. Barnes), 34-76, Holt Rinehart & Winston, Inc., New York.
- Burnham, C.W., 1979. Magmas and hydrothermal fluids. En: Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. 2nd. edit. (Ed. H.L. Barnes), 71-136. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173-174.
- Compston, W., Chappell, B.W., 1979. Sr isotope evolution of granitoid source rocks. En: The Earth: its Origin, Structure and Evolution (Ed.: M.W. Mc Elhinny), 377-426, Academic Press, London.
- Fyfe, W.S., 1970. Some thoughts on granitic magmas. En: Mechanism of Igneous Intrusion (Eds.: G. Newall, and N. Rast), 201-216, Liverpool.

- Fyfe, W.S., Price, N.J., Thompson, A.B., 1978. *Fluids in the Earth's Crust*. Elsevier, Amsterdam.
- Hildreth, W., 1981. Gradients in Silicic Magma Chambers: Implications for Lithospheric Magmatism. *J. of Geophys. Res.* 86: B11. 10153-10192.
- Nicolas, A., Bouchez, J.L., Blaise, J., Poirier, J.P., 1977. Geological aspects of deformation in continental shear zones. *Tectonophysics*, 42: 55-73.
- Parada, M.A., Munizaga F., Kawashita, K., 1981. Edades Rb-Sr roca total del Batolito compuesto de los Rios Elqui-Limarí a la latitud 30°S. *Rev. Geol. Chile*, 13-14: 87-93.
- Presnall, D.C., 1969. The geometrical analysis of partial fusion. *Amer. Jour. Sci.*, 267: 1178-1194.
- Ramberg, H., 1970. Model studies in relation to intrusion of plutonic bodies. En: *Mechanism of Ingeous Intrusion* (Eds.: G. Newall and N. Rast), 261-286. Gallery Press, Liverpool.
- Rast, N., 1980. Mechanism of Igneous intrusion: a discussion. En: *Mechanism of Ingeous Intrusion* (Eds. G. Newal y N. Rast), 339-362. Gallery Press, Liverpool.
- Reitan, P.H., 1968a. Frictional heat during metamorphism. 1. Quantitative evolution of concentration of heat generation in time. *Lithos*. 1: 151-163.
- Reitan, P.H., 1968b. Frictional heat during metamorphism. 2. Quantitative evolution of concentration of heat generation in space. *Lithos* 1: 268-274.
- Sibson, R.H., 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *J. Geol. Soc. Lond.*, 133: 191-213.
- Strong, D.F., Hanmer, S.K., 1981. The Leucogranites of Southern Brittany: origin by faulting, frictional heating fluid, flux and fractional melting. *Canad. Mineral*, 19: 163-176.
- Tuttle, O., Bowen, N.L., 1958. Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₃-KA1Si₃O₈-SiO₂-H₂O. *Geol. Soc. Am.*, Memoir, 74.
- Younker, L.W., Vogel, T.A., 1976. Plutonism and plate dynamics: the origin of circum-placific batholiths. *Canad. Mineral.*, 14., 238-244.