

# CINÉTICA DE LA NUCLEACIÓN Y EL CRECIMIENTO DEL GRANATE EN LAS ROCAS METAPELÍTICAS DE LA FORMACIÓN SILGARÁ, REGIÓN SUROCCIDENTAL DEL MACIZO DE SANTANDER

Ríos Reyes, C.<sup>1</sup>, Gélvez Llanes, J., Márquez Romero, R. y Castellanos Alarcón, O.

## RESUMEN

El granate en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará que afloran en la región suroccidental del Macizo de Santander muestra diferentes variedades texturales y brinda una valiosa información acerca de la historia de deformación que han sufrido estas rocas. El análisis de la distribución de tamaños de grano ("Crystal Size Distribution", CSD) de este mineral revela que este creció durante un lapso de tiempo que oscila entre 1.342 y 81.511 años, con tasas de nucleación que disminuyen a medida que aumenta el grado de metamorfismo. El crecimiento del granate se habría dado a través de reacciones multivariantes combinadas con altos valores de "overstepping" crítico. Las condiciones de nucleación y crecimiento fueron relativamente constantes a través del tiempo y la pequeña desviación del comportamiento exponencial de las CSDs refleja que la ocurrencia de procesos de disolución y "annealing" una vez finalizado el crecimiento del mismo fueron de poca magnitud.

**Palabras clave:** Granate, Formación Silgará, Macizo de Santander, distribución de tamaños de grano, nucleación, crecimiento, disolución.

## ABSTRACT

Garnet in the Silgará Formation metapelitic rocks that crop out in the southwestern region of the Santander Massif shows different textural varieties and provides valuable information about the deformation history. The Crystal Size Distribution (CSD) analysis of this mineral reveals that it grew between 1.342 and 81.511 years, with nucleation rates decreasing with increasing metamorphic grade. Garnet possibly grew through multivariant reactions combined with high values of critical "overstepping". The nucleation and growth conditions were relatively constant through time and the small deviation of the exponential behavior of CSD reflects that dissolution and "annealing" process were low in magnitude after garnet growth ceased.

**Keywords:** Garnet, Silgará Formation, Santander Massif, Crystal Size Distribution, nucleation, growth, dissolution.

<sup>1</sup>Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, A.A. 678, Bucaramanga (COLOMBIA).  
Correo electrónico: carios@uis.edu.co

## INTRODUCCIÓN

Algunos trabajos (p. ej., Carlson *et al.*, 1995; Spear & Daniel, 1998) sugieren que el crecimiento de porfidoblastos es controlado por difusión o por interfase, aunque en ningún caso se explica la distribución de tamaños de cristales. Estos estudios no han sido enfocados a los posibles efectos de la deformación. Los efectos de la estructura sobre los procesos cinéticos han sido de interés en recientes trabajos (p. ej., Bell *et al.*, 1986; Bell & Rubenach, 1983; Cameron, 1999). El proceso crítico es la partición de la deformación en zonas de cizallamiento progresivo y de acortamiento progresivo, como lo describen Bell *et al.* (1986), quienes argumentan que la nucleación de porfidoblastos estaría restringida a las zonas de acortamiento progresivo, mientras que los sitios más favorables para que ocurra un proceso de disolución serían las zonas de cizallamiento progresivo. Los procesos estructurales ejercen una influencia importante sobre la cinética de nucleación y crecimiento de porfidoblastos de granate, lo cual se refleja en la distribución de tamaños de cristales y la zonación química de granate.

El presente trabajo lleva a cabo un análisis cuantitativo de la distribución de tamaños de grano (CSD) de granate en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará en la región suroccidental del Macizo de Santander, según el método de Cashman & Ferry (1988), con el fin de establecer su nucleación y crecimiento. Algunos autores (p. ej., Kretz, 1966; Wood & Walther, 1983; Walther & Wood, 1984; Marsh, 1988; Cashman & Marsh, 1988; Cashman & Ferry, 1988; Waters & Lovegrove, 1998) han jugado un papel importante en el desarrollo de modelos para la nucleación y el crecimiento de minerales. El estudio de la CSD suministra información con relación a las condiciones originales de cristalización y las modificaciones posteriores debidas a recocido o "annealing".

## MÉTODOS Y TÉCNICAS ANALÍTICAS

La metodología usada en el presente estudio incluye el análisis de la información bibliográfica, la selección de rocas metapelíticas con presencia de granate, el análisis mineralógico y petrográfico de las muestras, y el tratamiento geoestadístico de datos petrográficos.

Un detallado estudio mineralógico y petrográfico de secciones delgadas se realizó en el laboratorio de microscopía de luz transmitida del Grupo de Investigación en Mineralogía, Petrología y Geoquímica "MINPETGEO" de la Universidad Industrial de Santander, utilizando un microscopio triocular de luz transmitida LABOPHOT2-POL (marca NIKON). Las abreviaturas minerales son las recomendadas por Kretz (1983).

La (CSD) fue medida en dos muestras de la zona del granate (PCM-441 y PCM-442) y cuatro muestras de la zona del granate-estaurolita (PCM-386, PCM-389, PCM-420 y PCM-424), siguiendo el método propuesto por Cashman & Ferry (1988). En la selección de dichas muestras se tuvo en cuenta principalmente que estas presentaran numerosos cristales de granate, y que éste fuera aproximadamente esférico y fácilmente discriminado por un analizador de imágenes, aunque esto último no fue posible debido a la calidad en la resolución (baja reflectividad del granate), así como a las características propias de esta herramienta y, por lo tanto, el granate se midió manualmente utilizando cuadrículas milimétricas que permitieran disminuir al máximo el margen de error al realizar las mediciones. La CSD se midió en la muestra PCM-420 a pesar de no contar con una gran cantidad de cristales de granate, ya que contaba con valiosa información desde el punto de vista textural y químico.

Los análisis de microsonda electrónica fueron llevados a cabo por Ríos (1999) usando un analizador JEOL JXA 8800M del Research Center for Coastal Lagoon Environments de la Universidad de Shimane (Japón), bajo las siguientes condiciones analíticas: voltaje de aceleración de 15 kV y corriente de prueba de  $2.5 \times 10^{-8}$  A. La composición química del granate se documentó a partir de transversas radiales de puntos analíticos.

## REACCIONES QUÍMICAS

Ríos (2001, comunicación oral) ha definido un esquema zonal (biotita, granate, granate-estaurolita y estaurolita-cianita) de tipo Barroviano en condiciones de media presión en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará que aflora en la región suroccidental del Macizo de Santander (FIGURA 1).

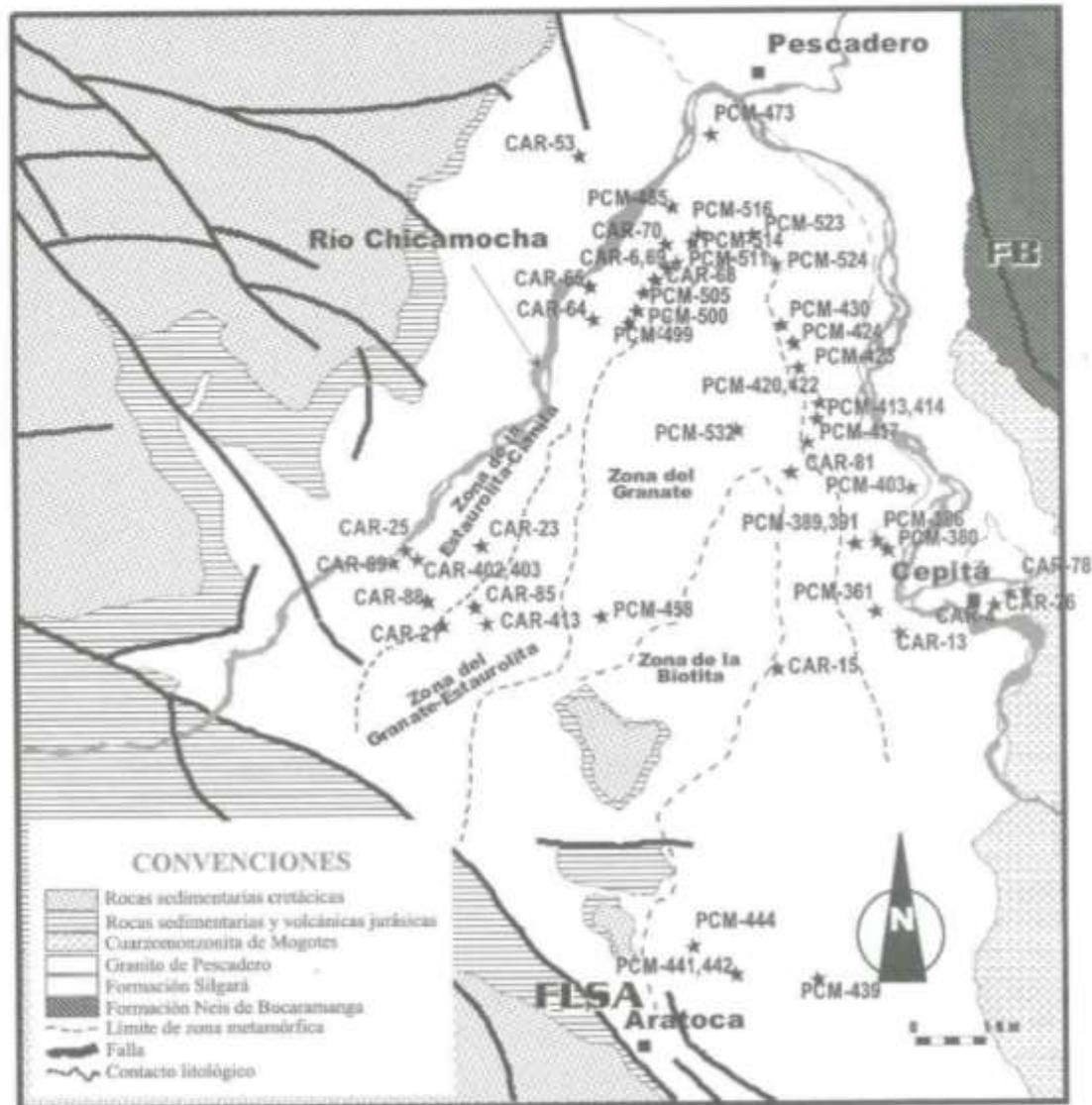
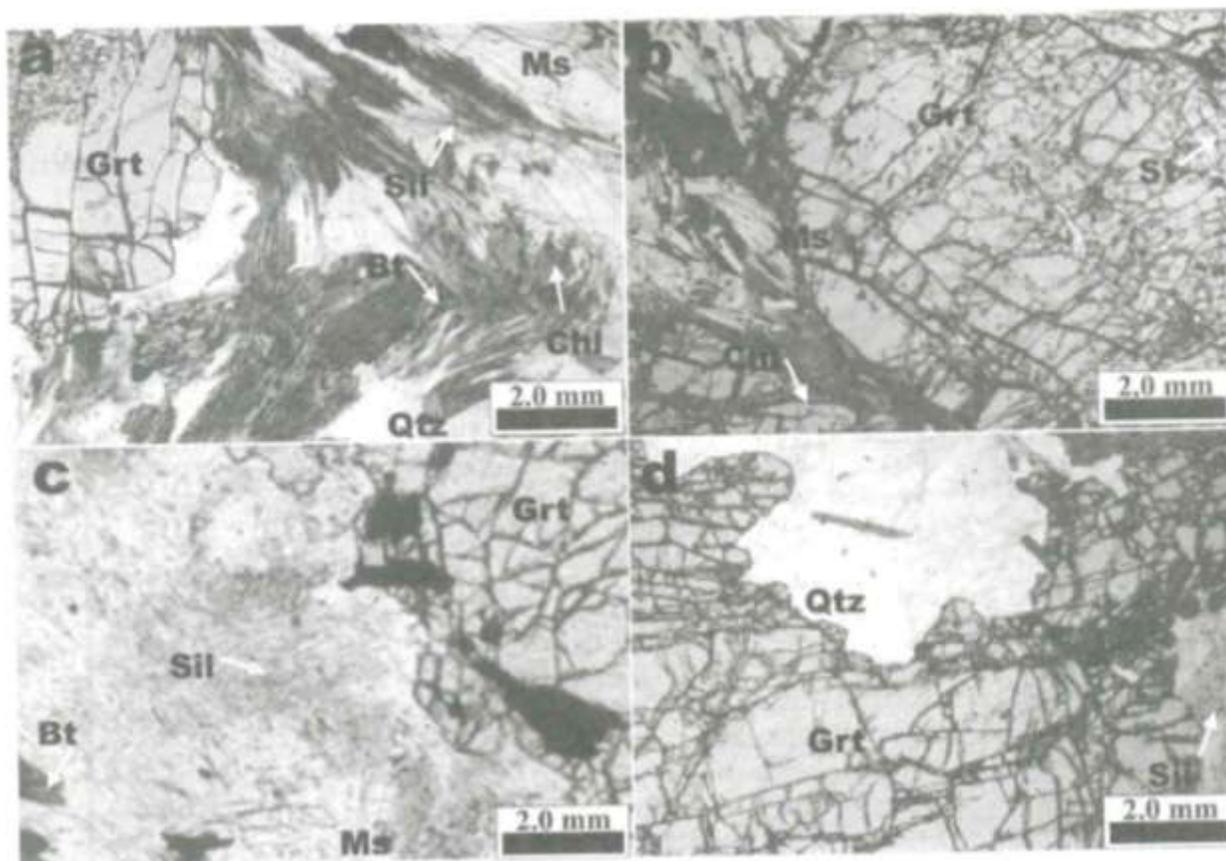


FIGURA 1. Mapa geológico de la región suroccidental del Macizo de Santander (modificado de Ward *et al.*, 1973), mostrando la localización de las muestras con presencia de granate. FB: Falla de Bucaramanga; FLSA: Falla Los Santos - Aratoca.

Evidencias texturales que reflejan la ocurrencia de algunas reacciones químicas en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará se ilustran en la FIGURA 2. Según Ríos y García (2001), el origen de la silimanita en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará en el área de estudio podría explicarse a través de dos mecanismos; (1) a partir de un metamorfismo hidrotermal y (2) a partir de un evento termal. Los agregados de fibrolita sugieren lugares donde las reacciones que formaron la silimanita ocurrieron más intensamente que en otra parte de las rocas (Grambling, 1981). Estos agregados podrían haberse formado a partir de un metamorfismo hidrotermal

inducido por fluidos calientes que migraron a lo largo de canales ahora representados por venas de cuarzo (Ferry, 1980). Por otra parte, el desarrollo de fibrolita en una etapa tardía es un fenómeno que ha sido propuesto en varios estudios llevados a cabo en rocas pelíticas metamorfoseadas regionalmente (p.e., Chinner, 1966). En nuestro caso, la formación de fibrolita podría ocurrir a través de una reacción química que ha involucrado la descomposición de granate y biotita y, por lo tanto, el proceso de fibrolitización no debe considerarse como una transformación polimórfica.



**FIGURA 2.** Texturas de reacción en rocas metapelíticas de la Formación Silgará, involucrando al granate ya sea como reactante o como producto de una reacción. (a) Reemplazamiento de biotita por silimanita fibrolítica y clorita en superficie de crenulación. PPL, muestra CAR-402, zona de la estaurolita-cianita. (b) Relictos corroídos de estaurolita en porfidoblasto de granate. Obsérvese el desarrollo de clorita lo largo de fracturas irregulares de porfidoblastos de granate. PPL, muestra CAR-13, zona del granate-estaurolita. (c) Textura de reacción en la cual silimanita fibrolítica y muscovita forman un agregado alrededor de porfidoblasto de granate. PPL, muestra PCM-473, zona del granate-estaurolita. (d) Cuarzo desarrollando embahamientos en porfidoblasto de granate. Silimanita fibrolítica se observa penetrando cristales de cuarzo en la parte derecha. PPL, muestra CAR-403, zona de la estaurolita-cianita.

El granate presente en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará es principalmente de tipo almandino y su crecimiento podría estar dado por la reacción química:



la cual, según Barrow (1893, 1912) (en Miyashiro, 1994), en la zona de los Scottish Highlands (Escocia) da lugar a la isógrada del granate.

No obstante, la formación de granate se pudo haber dado a menor temperatura (~ 450°C) en rocas ricas en MnO y CaO (Spear, 1993). Para que durante el metamorfismo aparezca una nueva fase mineral a partir de una reacción química, es necesario que operen en conjunto una serie de procesos (disolución,

transferencia de masa, nucleación y crecimiento), los cuales se ilustran en la FIGURA 3.

La interacción de los procesos mencionados arriba es de gran complejidad, y para que estos puedan ocurrir es necesario que se rompa el equilibrio químico existente en la roca, de tal manera que las reacciones que permiten el crecimiento de nuevas fases minerales se den. Según Waters & Lovegrove (1998), durante el metamorfismo prógrado el suministro de calor conducirá a exceder la temperatura de equilibrio de una reacción, generando una fuerza química impulsora que favorece el crecimiento cristalino, la cual es proporcional a la cantidad excedida (en grados) con relación a la temperatura de equilibrio y cuya medida se conoce como sobrepaso u "overstepping".

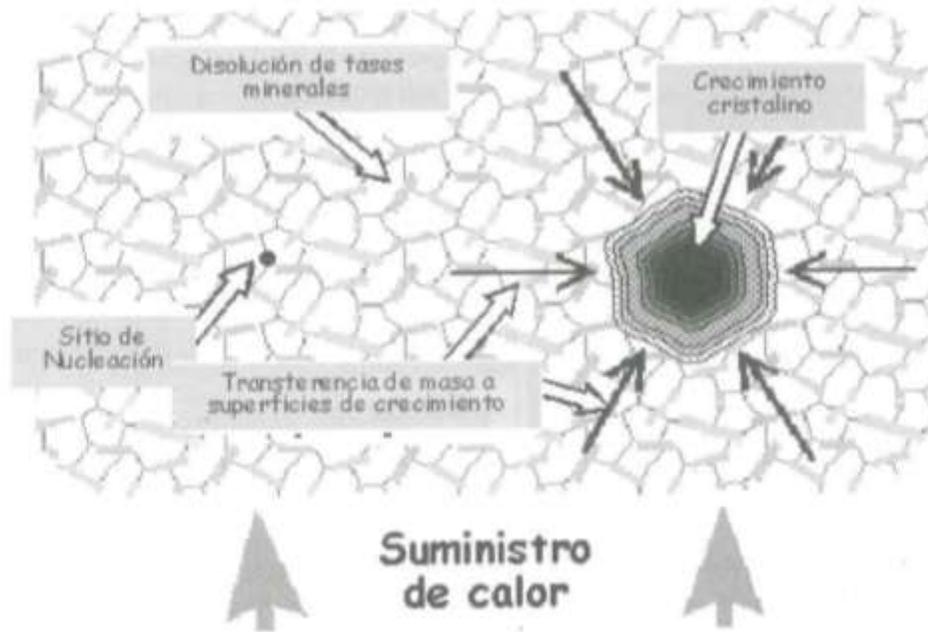


FIGURA 3. Reacciones químicas en las rocas, las cuales involucran procesos de disolución, nucleación, transferencia de masa y crecimiento. Modificado de Waters & Lovegrove (1998).

### EFFECTOS DE LA ESTRUCTURA SOBRE LA CINÉTICA DE LA NUCLEACION Y EL CRECIMIENTO

Los efectos que producen los procesos estructurales sobre la cinética de la nucleación y el crecimiento de porfiroblastos son aún un problema por resolver. No obstante, este aspecto ha sido de gran interés en algunos trabajos (p. ej., Bell & Rubenach, 1986; Cameron, 1999). Bell & Rubenach (1986) han

propuesto que como consecuencia de la heterogeneidad existente en las rocas que han sufrido metamorfismo regional, el comportamiento de estas con la deformación varía de acuerdo a sus características composicionales y estructurales. En respuesta a esta heterogeneidad, la deformación tiene un carácter diferencial, generando zonas de cizallamiento y de acortamiento dentro de un mismo volumen de roca (FIGURA 4), haciendo que los gradientes de deformación y las tasas de deformación



FIGURA 4. Diferenciación de la deformación generando zonas de cizallamiento (disolución) y de acortamiento (nucleación) dentro de un mismo volumen de roca. Afloramiento de rocas metapelíticas con presencia de granate de la Formación Silgará, zona del granate-estaurolita.

a través de los límites entre estas zonas varían de un sitio a otro de acuerdo al componente de la deformación que predomine (cizallamiento o acortamiento).

Bell & Hayward (1991) usan este mecanismo para explicar el crecimiento de porfidoblastos de granate con base en las discontinuidades texturales que definen los patrones de inclusiones. A medida que se desarrolla un clivaje de crenulación, las tazas de deformación en la zona de cizallamiento progresivo alcanzarán un punto donde el material no será capaz de moverse entre las zonas de cizallamiento y de acortamiento. De esta manera, el crecimiento de porfidoblastos se detendrá una vez que todos los reactantes en la zona de acortamiento progresivo hayan sido consumidos.

En las zonas de cizallamiento progresivo (zonas de deformación no coaxial) los altos gradientes de dislocación y de potencial químico producen una disolución de la mayoría de fases minerales (silicatos y óxidos), excepto filosilicatos y grafito, los cuales se adaptan bien para acomodarse al cizallamiento progresivo sin necesidad de formar grandes gradientes de dislocación al interior de los cristales debido a la estructura desigual de sus cristales. Por lo tanto, las zonas de cizallamiento progresivo se convierten en zonas de disolución de la mayor parte de minerales y de concentración de filosilicatos y grafito (Bell & Rubenach, 1986). Estos autores consideran de otra parte que las zonas de acortamiento progresivo (zonas de deformación coaxial) son propicias para la precipitación del material disuelto en las zonas de cizallamiento, de tal manera que se convierten en sitios adecuados para la nucleación y el crecimiento de cristales de cuarzo y feldespato, así como de porfidoblastos de granate. Las zonas de acortamiento son propensas al microfracturamiento y por lo tanto el régimen de flujo de fluidos con iones disueltos a través de las mismas es mayor que el de las zonas de cizallamiento, y tienen una serie de características que ayudan a disminuir la barrera de energía de activación de la nucleación.

La nucleación y el crecimiento de porfidoblastos de granate en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará no pudo llevarse a cabo en zonas de cizallamiento progresivo activo, ya que este mineral

sería disuelto, pero sí en zonas de acortamiento progresivo, lo cual es ayudado por la presencia de microfracturamiento en estas zonas, permitiendo el rápido acceso de fluidos portadores de los nutrientes necesarios para la nucleación y el crecimiento. Según Bell *et al.* (1986), el crecimiento de porfidoblastos de granate es generalmente sin-deformacional, y los criterios previamente aceptados para un crecimiento estático no son válidos cuando se toma en cuenta el papel de la partición de la deformación.

En el presente trabajo se examinan los efectos que producen los procesos estructurales sobre la nucleación y el crecimiento, así como la disolución de porfidoblastos de granate. Para que se de la formación de porfidoblastos es necesario que ocurran en conjunto los procesos (disolución de material que suministre una fuente de iones, transferencia de masa de estos iones a los sitios de nucleación y crecimiento) descritos con anterioridad. No obstante, estos procesos están probablemente influenciados por el desarrollo microestructural de la roca (y viceversa), incluyendo (1) la creación de sitios de nucleación apropiados para la formación de porfidoblastos, (2) la localización de estos sitios con respecto a los rasgos microestructurales y, (3) la preservación o disolución de porfidoblastos durante un proceso de deformación y metamorfismo adicional. Los aspectos más significativos con respecto a la relación porfidoblasto-matriz en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará en el área de estudio se describen a continuación (FIGURA 5). Algunos porfidoblastos pueden preservar en patrones de inclusiones o adyacente a regiones de sombras de presión foliaciones y lineaciones más jóvenes en el momento de su crecimiento, aún aunque la roca haya sido posteriormente deformada. En otros casos pueden haber crecido post-tectónicamente una foliación temprana, facilitando el entendimiento del desarrollo de pliegues. Los porfidoblastos brindan una valiosa información acerca de la historia de deformación, ya que estos no rotan durante acortamiento inhomogéneo progresivo coaxial o no coaxial de la roca, permitiendo una fácil interpretación de su tiempo relativo con los eventos de deformación, gracias a las relaciones entre los patrones de inclusiones y la foliación externa, aunque podrían rotar durante cizallamiento progresivo simple (Bell & Rubenach, 1986). La reactivación de

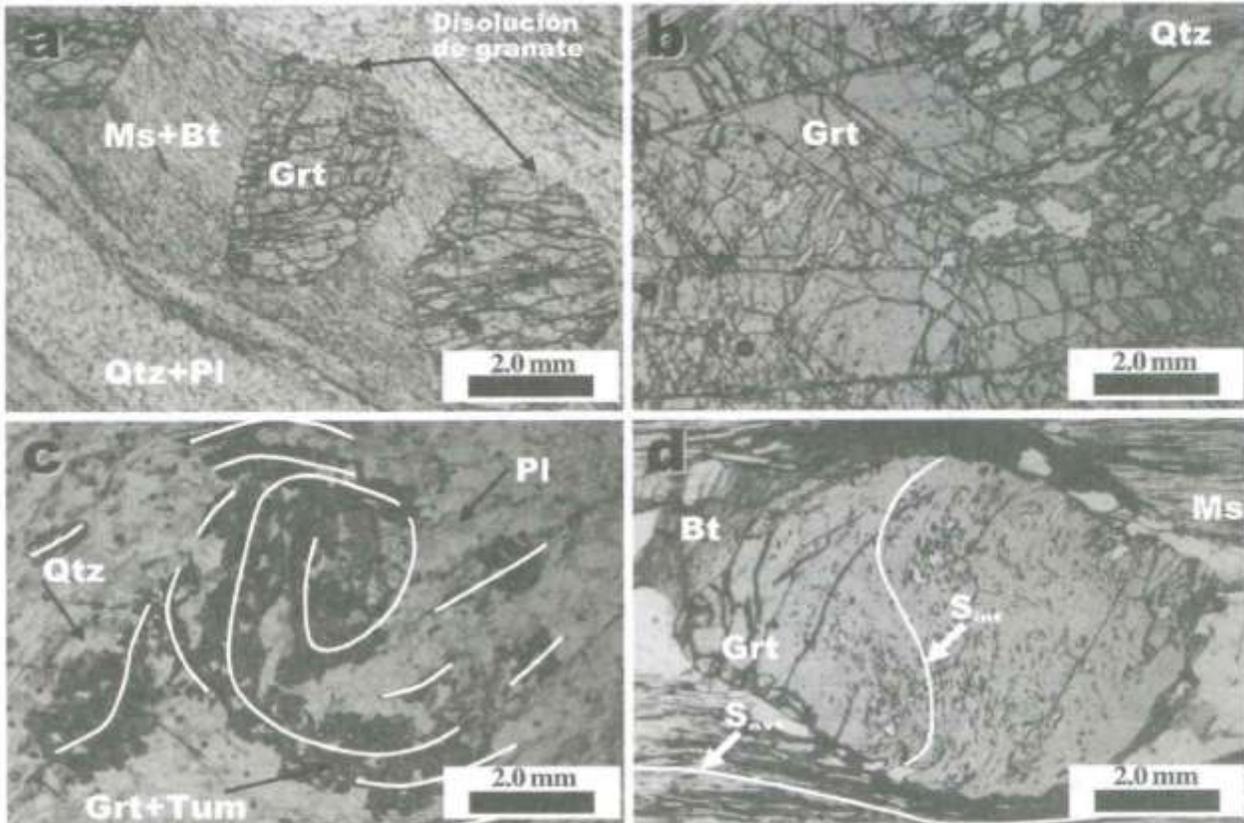


FIGURA 5. Microfotografías que ilustran la relación porfidoblasto-matriz, así como el efecto estructural sobre la nucleación y crecimiento de porfidoblastos de granate. (a) Porfidoblastos de granate con un contorno euhedral donde este no está en contacto con zonas de cizallamiento progresivo, en las cuales este mineral ha sido disuelto según  $S_{2p}$ , como lo revela el abrupto truncamiento de su forma. PPL, muestra CAR-68, zona del granate-estaurolita. (b) Borde esquelético de un porfidoblasto de granate mostrando cómo los cristales de cuarzo de las sombras de presión son incorporados en el crecimiento cristalino como inclusiones ligeramente elongadas, desarrollando una  $S_{int}$  cuya curvatura pudo haber sido causada por la rotación relativa entre el porfidoblasto y la matriz. PPL, muestra PCM-413, zona del granate-estaurolita. (c) Crecimiento de granate y turmalina sin-tectónico, definiendo un patrón en espiral, lo cual refleja el fenómeno de rotación de porfidoblastos en una matriz que sufre deformación. El granate muestra un carácter poiquiloblástico y esquelético debido a la presencia de inclusiones de cuarzo y plagioclasa. PPL, muestra PCM-380, zona del granate-estaurolita. (d) Porfidoblasto de granate de carácter sin-tectónico, mostrando un patrón de inclusiones sigmoidales ( $S_{int}$ ), así como una rotación en sentido antihorario de aproximadamente  $45^\circ$  con respecto a  $S_{ext}$ . PPL, muestra CAR-413, zona de la estaurolita-cianita.

foliaciones más jóvenes es claramente demostrada por la relación entre los patrones de inclusiones y la foliación externa, lo cual podría ser un proceso dominante durante el desarrollo de la foliación.

#### DISTRIBUCION DE TAMAÑOS DE GRANO

Recientemente, los petrólogos han venido dando especial atención a la cuantificación de la distribución de tamaños de grano o "Crystal Size Distribution" (CSD). En algunos estudios llevados a cabo en rocas metamórficas (p. ej., Marsh, 1988; Cashman & Marsh, 1988) la interpretación de las CSDs ha sido de gran

importancia en la determinación de las condiciones de nucleación y crecimiento de una fase mineral, generando información cuantitativa acerca de las tasas de nucleación y crecimiento, los tiempos de crecimiento, los flujos de calor durante el metamorfismo, entre otros aspectos.

En el presente trabajo se lleva a cabo la determinación de las CSDs del granate en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará en la región suroccidental del Macizo de Santander con el fin de contribuir al entendimiento de su historia dinámica. Los cristales de granate en estas rocas muestran un rango de tamaños y, por lo tanto, es posible ilustrar las CSDs

como histogramas de frecuencia (FIGURA 6) a partir del número de cristales por unidad de área ( $N_A$ ), el cual se obtuvo dividiendo el número de individuos con un determinado tamaño ( $L$ ) por el área (de la sección delgada) de trabajo. No obstante, en la muestra PCM-420 la distribución se hizo por intervalos de tamaños de cristales, ya que el número de los mismos dentro de la sección delgada era muy pequeño con respecto al de las otras muestras.

Los histogramas de frecuencia (FIGURA 6) se caracterizan por definir una curva en forma de campana, con un número máximo de cristales en los tamaños menores principalmente e intermedios. Estas distribuciones son similares a las determinadas por algunos autores (p. ej., Cashman & Ferry, 1988) en cristales de diferentes fases minerales presentes en rocas metapelíticas. La interpretación inicial de estos diagramas permite establecer que los primeros cristales que nuclearon tenderían a alcanzar un mayor tamaño de grano y, por lo tanto, este tipo de diagramas se pueden leer de derecha a izquierda como un registro de las variaciones en la tasa de nucleación a través del tiempo. Según Waters & Lovegrove (1998), la parte derecha de estos diagramas representa el inicio

de la nucleación (primeros cristales en nuclear), la parte intermedia muestra un progresivo aumento del número de cristales y una disminución del tamaño de los mismos, lo cual refleja una aceleración de la nucleación con respecto a la tasa de crecimiento, y la parte izquierda muestra una disminución del número de cristales, representando los últimos estados de nucleación en los que la tasa de nucleación también disminuye.

Posteriormente, la distribución de tamaños por unidad de área se transformó en una distribución de tamaños por unidad de volumen, la cual representa condiciones más reales. La conversión más simple que existe para llevar la CSD a una expresión volumétrica es la propuesta por Wagner (1961) y Kirkpatrick (1977) (en Cashman & Ferry, 1988), donde el número de cristales por unidad de volumen ( $N_V$ ) es determinado a partir de la relación:

$$N_V = (N_A)^{1.5}$$

No obstante, la forma más común de presentar una CSD y de la cual se puede obtener mayor información es planteando  $\ln(n)$  vs.  $L$ , donde  $n$  representa la

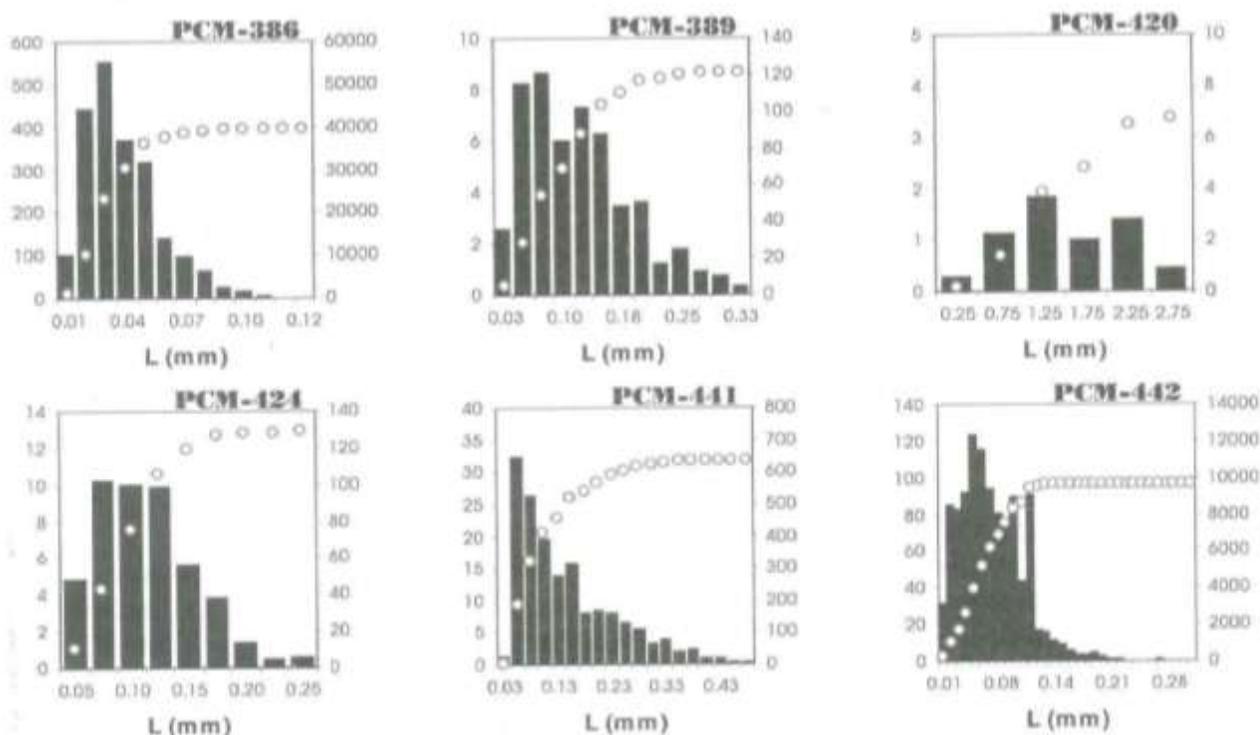


FIGURA 6. Histogramas de frecuencia ( $N_A$  vs.  $L$ ), eje izquierdo, y curvas de frecuencia acumulada por unidad de volumen ( $N_V$  Acumulada vs.  $L$ ), representada por puntos, eje derecho, correspondientes a cristales de granate en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará.

densidad de población por unidad de volumen, la cual se define como la pendiente de la curva de frecuencia acumulada de L por unidad de volumen ( $N_V$ ). Por lo tanto, para calcular n fue necesario preparar inicialmente las curvas de frecuencia acumulada por unidad de volumen (FIGURA 6), a partir de las cuales se obtuvo la

densidad de población mediante el cálculo matemático de la pendiente de la curva para cada uno de los intervalos de tamaños de cristales y, finalmente planteando  $\ln(n)$  vs. L se obtuvieron las CSDs que se ilustran en la FIGURA 7.

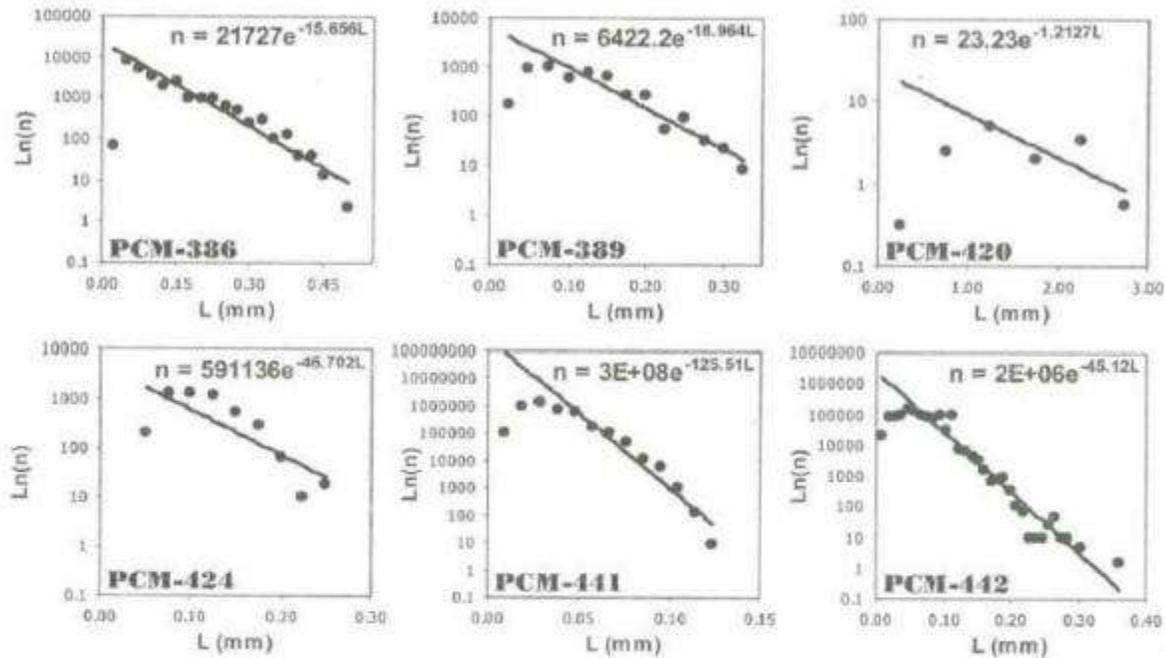


FIGURA 7. CSDs en función de  $\ln(n)$  Vs. L (Note la diferencia en escalas entre las muestras) del grana en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará, mostrando la ecuación que define el comportamiento lineal de la distribución.

## ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE GRANO

Las CSDs (FIGURA 7) reflejan la distribución inicial  $N_V$  vs. L, conservando la forma de campana inicial y presentando un punto de inflexión a partir del cual el comportamiento a cada lado del mismo es diferente. Cashman & Ferry (1988) establecen que la forma de la CSD está controlada por los cambios en la tasa de nucleación con el tiempo. En las muestras analizadas la parte derecha de esta distribución (a la derecha del punto de inflexión) refleja la aceleración inicial de la tasa de nucleación, la cual muestra un comportamiento exponencial, mientras que la parte izquierda (a la izquierda del punto de inflexión) refleja una disminución de la tasa de nucleación en las etapas finales, lo cual se puede explicar a partir de diferentes procesos que serán discutidos más adelante.

A continuación se describen algunas generalizaciones acerca de las CSDs, las cuales han sido realizadas por Cashman & Ferry (1988).

El comportamiento aproximadamente lineal que en general muestra la parte derecha de las CSDs en las rocas metapelíticas analizadas ha sido definido por algunos autores por la ecuación exponencial  $n = n^{0e-bL}$ , donde n es la densidad de población, no es la intersección en  $L = 0$ , b es una constante que describe la pendiente de la recta, y L es el tamaño del cristal.

### *Tazas de crecimiento y nucleación y tiempos de crecimiento durante el metamorfismo regional.*

La TABLA 1 muestra cómo pueden relacionarse directamente los parámetros que contiene una CSD, los cuales se describen a continuación

A partir de la ecuación exponencial expresada arriba es posible determinar el número total de cristales ( $N_T$ ) a partir de la ecuación (1). El tamaño promedio de cristales ( $L^p$ ) puede obtenerse a partir de la ecuación (2). Por otra parte, Cashman & Ferry (1988) definen el tiempo promedio de crecimiento ( $t^p$ ) a partir de la ecuación (3), donde  $t^p$  es el tiempo promedio de crecimiento,  $G^p$  es la tasa promedio de crecimiento lineal, y  $L^p$  es el tamaño promedio de cristales, así como la tasa promedio de nucleación ( $J^p$ ), la cual está dada por la ecuación (4).

TABLA 1. Relaciones entre parámetros de una CSD con las tasas de nucleación y crecimiento y los tiempos de crecimiento, según Cashman & Ferry (1988).

- (1)  $N_T = \int_0^{\infty} n^0 e^{-bL} dL = n^0/b$
- (2)  $L^p = 1/b$
- (3)  $t^p = L^p/G^p$
- (4)  $J^p = N_T/t^p$
- (5)  $dm/dt = K_r(\Delta S(T-T_{eq})/RT)$
- (6)  $dr/dt = 1/W(dm/dt)$
- (7)  $\log K_r = -2900/T - 6.85$
- (8)  $dr/dt = k^*/r(1/r^* - 1/r)$
- (9)  $r^*(t)^a - r^*(0)^a = k^{**}t$
- (10)  $N_T(0)/N_T(t) = (r^p(t)/r^p(0))^3$
- (11)  $F = N/N_T(0) = 1 - \exp(-x)$
- (12)  $M/M_T = 1 - \exp(-x)(1 + x + 1/2x^2 + 1/6x^3)$

Walther & Wood (1984) han propuesto empíricamente una ley de crecimiento a partir de la relación entre la tasa de crecimiento y la temperatura, la cual establece que la tasa de transferencia de masa ( $dm/dt$ ), expresada en  $mol\ cm^{-2}\ s^{-1}$ , a una temperatura dada puede calcularse a partir de la ecuación (5), donde  $DS$  es la entropía de la reacción bajo las condiciones de  $P$  y  $T$  de crecimiento de un mineral,  $T-T_{eq}$  ( $=DT$ ) representa el "overstepping" de la reacción,  $K_r$  es una

constante de la tasa de reacción que depende de la temperatura y está expresada en  $\text{átomos-gramo de oxígeno}\ cm^{-2}\ s^{-1}$ , y  $R$  es la constante de los gases expresada en  $cal\ K^{-1}\ mol^{-1}$ . Por otra parte, la tasa de crecimiento lineal ( $dr/dt$ ) está dada por la ecuación (6), donde  $r$  es el radio del cristal y  $W$  es una normalización a unidades de átomos-gramo de oxígeno por mol que se obtiene a partir de la fórmula química de cada mineral (en el caso del granate equivale a 0.051, según Cashman & Ferry, 1988).

Las ecuaciones (3), (5) y (6) establecen una relación entre  $L^p$  (medida a partir del valor de  $b$ ),  $K_r$  (calculada de Walther & Wood, 1984, a partir de la ecuación (7)),  $W$  (calculada de la fórmula química de los minerales),  $T_{eq}$  (establecida por Cashman & Ferry, 1988, para el granate, de acuerdo a la zona metamórfica de interés),  $DS$ ,  $DT$  y  $t^p$ . Aunque los valores de  $DS$  y  $DT$  en la práctica son casi imposibles de estimar, se pueden asumir, tal como lo proponen Cashman & Ferry (1988), variaciones en entropía de  $1\ cal/^{\circ}C$  y en temperatura de  $1^{\circ}C$ . Con base en estas consideraciones y asumiendo temperaturas de equilibrio de  $450^{\circ}C$  para la zona del granate y  $500^{\circ}C$  para la zona del granate-estaurolita, similares a las propuestas por Cashman & Ferry (1988), se calcularon las tasas de crecimiento y nucleación y los tiempos promedio de crecimiento para cada una de las CSDs descritas inicialmente. La TABLA 2 resume los resultados correspondientes a las tasas de crecimiento y nucleación, así como los tiempos promedio de crecimiento del granate analizado.

Los tiempos promedio de crecimiento estimados para el granate oscilan entre 1.342 y 81.511 años, aunque no es posible establecer una variación sistemática del mismo con respecto a la zonación metamórfica. Estos

TABLA 2. Tasas de crecimiento y nucleación, y tiempos promedio de crecimiento del granate en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará.

Muestra	Zona Metamórfica	$T_{eq}$ ( $^{\circ}C$ )	$1/b$ (cm)	Tasa de crecimiento, $G$ ( $cm/s$ )	Tiempo promedio de crecimiento (años)	$n^0$ ( $cm^{-4}$ )	Tasa de nucleación, $J$ ( $cm^{-2}s^{-1}$ )
PCM-386	Grt-St	500	0.0639	$3.19 \times 10^{-13}$	6262.4	21727	$7.02 \times 10^{-9}$
PCM-389	Grt-St	500	0.0527	$3.19 \times 10^{-13}$	5169	6422.2	$2.07 \times 10^{-9}$
PCM-420	Grt-St	500	0.8246	$3.19 \times 10^{-13}$	81511	23.23	$7.46 \times 10^{-12}$
PCM-424	Grt-St	500	0.0214	$3.19 \times 10^{-13}$	1988	591136	$2.01 \times 10^{-7}$
PCM-441	Grt	450	0.0080	$1.88 \times 10^{-13}$	1342.6	$3 \times 10^8$	$5.64 \times 10^{-5}$
PCM-442	Grt	450	0.0222	$1.88 \times 10^{-13}$	3542	$2 \times 10^8$	$3.96 \times 10^{-7}$

valores de tiempo son similares a los estimados por Walther & Wood (1984) para su modelo de metamorfismo regional. Así mismo, las tasas de nucleación calculadas disminuyen con el aumento del grado de metamorfismo, siendo mayor en la zona del granate,  $5.64 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ , y menor en la zona del granate-estauroлита,  $7.02 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ , confirmando esto lo propuesto por Cashman & Ferry (1988) con respecto a la dependencia de las tasas de nucleación con el régimen de metamorfismo, de manera que estas son mucho mayores durante el metamorfismo de contacto y disminuyen durante el metamorfismo regional a medida que aumenta el grado de metamorfismo.

#### *"Ostwald ripening" durante el metamorfismo regional*

El término de "Ostwald ripening" ha sido utilizado para describir el aumento del tamaño de grano que ocurre una vez que el "annealing" de una fase dispersa en un agregado policristalino haya terminado después de la cristalización primaria. Numerosos cristales pequeños se forman en un sistema inicialmente, pero lentamente desaparecen, excepto algunos que continúan creciendo a expensas de los más pequeños, actuando como nutrientes para los cristales más grandes. Según Cashman & Ferry (1988), este proceso está caracterizado por el simultáneo crecimiento y disolución de partículas separadas en el mismo medio. En un agregado compuesto de cristales de más de un tamaño, sólo un tamaño de cristal está en verdadero equilibrio con sus circundantes y tiene el radio crítico ( $r^*$ ). La matriz estará supersaturada con respecto a los cristales con  $r > r^*$ , los cuales crecerán más, mientras que los cristales con  $r < r^*$  crecerán menos y eventualmente desaparecerán. Estos autores presentan algunas ecuaciones relevantes al proceso de "Ostwald ripening", (véase TABLA 1).

Según estos autores, la tasa de crecimiento de un cristal de radio ( $r$ ) está relacionado con el radio crítico ( $r^*$ ) a partir de la ecuación (8), donde  $k'$  es una constante que depende de la temperatura y  $r^*$  aumenta en función del tiempo tal como se expresa en la ecuación (9), donde el exponente  $a$  depende del mecanismo de crecimiento y varía entre 2 y 3. Esta ecuación también

describe el aumento en el tamaño de grano promedio ( $r^p$ ) con el tiempo, ya que  $r^p = cr^a$ , donde  $c$  es una constante que depende del mecanismo de crecimiento y varía entre 9/8 y 1. El balance de masa establece que el número total de cristales ( $N_T$ ) en el sistema debe disminuir con el tiempo, como se expresa en la ecuación (10). Los valores de  $N_T(0)$  y  $r^p(0)$  fueron calculados a partir de la distribución lineal de la CSD, representando las condiciones iniciales de nucleación y crecimiento anteriores al proceso de "annealing", siendo  $r^p(0) = \frac{1}{2}L^p$ . Por otra parte, la desviación del comportamiento lineal que sufre la CSD, refleja las condiciones del proceso de "Ostwald ripening" y, por lo tanto, a partir de esta se obtuvo el número total de cristales y el tamaño de los mismos en el momento  $t$ , al finalizar el "annealing", representando las condiciones actuales de la muestra.  $N_T(t)$  fue medida a partir de la parte izquierda de la CSD y  $r^p(t)$  se obtuvo de la ecuación (10). Por lo tanto, obteniendo los valores de  $N_T(0)$  y  $N_T(t)$  es posible determinar el número de cristales disueltos durante el "annealing", sencillamente como la diferencia entre estos dos parámetros, es decir,  $N_T(0) - N_T(t) = N$ .

#### *Tiempos de "annealing" y transferencia de masa*

Al analizar la desviación del comportamiento lineal de las CSDs para el granate de las rocas metapelíticas de la Formación Silgará, se considera que la causa más probable de dicha desviación es el proceso de "Ostwald ripening", en el cual, una vez finalizada la nucleación, los cristales de menor tamaño fueron disueltos sirviendo de nutrientes para el recrecimiento de los cristales de mayor tamaño. Asumiendo que los cristales se disuelven secuencialmente de acuerdo a su tamaño, el tamaño del cristal más pequeño originalmente que no desaparece durante el "annealing" se puede determinar a partir del momento cero, y la masa transferida, representada por el número de cristales disueltos, puede estimarse a partir del tercer momento de la distribución (distribución acumulativa de masa). El número original de cristales puede estimarse a partir de la ecuación (1). Si se conoce una tasa constante para el crecimiento del granate que ha sufrido "annealing", es posible estimar los tiempos de "annealing" usando esta información y la ecuación (8).

TABLA 3. Cálculo de la masa total de granate transferida a través del proceso de "annealing" de los cristales pequeños.

Parámetro	PCM-386	PCM-389	PCM-420	PCM-424	PCM-441	PCM-442
$b, \text{cm}^{-1}$	15.656	18.964	1.213	46.702	125.510	45.120
$L^0 = 1/b, \text{cm}$	0.063873	0.052731	0.824606	0.021412	0.007967	0.022163
$n^0, \text{cm}^{-4}, \text{ en } L = 0$	21727	64222	23.23	591136	30000000	2000000
$N_t(0) = n^0/b, \text{cm}^{-3}$	1387.77	338.65	19.16	12657.62	2390247.79	44326.24
$N_t(t), \text{cm}^{-3}$	186.70	53.28	4.80	43.09	23161.87	3951.80
$N_t(0)/N_t(t)$	7.4	6.4	4.0	293.7	103.2	11.2
$N = N_t(0) - N_t(t), \text{cm}^{-3}$	1201.07	285.37	14.35	12614.52	2367085.92	40374.44
$F = N/N_t = 1 - \exp(-x)$ , despejando $x$ ,	0.8655	0.8427	0.7493	0.9966	0.9903	0.9108
$X = -\text{LN}(1-F)$	2.0059	1.8494	1.3835	5.6827	4.6366	2.4174
$N_t = n^0/b, \text{cm}^{-3}$	1387.77	338.65	19.16	12657.62	2390247.79	44326.24
$L = x/b, \text{cm}$	0.1281	0.0975	1.1409	0.1217	0.0369	0.0536
$^*MM_t = 1 - \exp(-x)(1+x+1/2x^2+1/6x^3)$	0.144	0.117	0.052	0.818	0.680	0.225

$MM_t$  es la fracción de masa transferida durante el "annealing".

Para la distribución lineal original la fracción del número acumulado está definido por la ecuación (11), siendo  $x = bL$  (según Randolph & Larson, 1971, en Cashman & Ferry, 1988), donde  $L$  es el diámetro original del cristal más pequeño, el cual no se disuelve durante el "annealing". Como  $F$  y  $b$  se conocen, es posible calcular el valor de  $L$  (y por tanto de  $x$ ). La cantidad de masa representada por los cristales más pequeños que  $L$  puede ser establecida substituyendo el valor de  $L$  (y por tanto de  $x$ ) dentro de la expresión de la fracción de masa acumulada (ecuación (12)), la cual representa el porcentaje de masa transferida durante el "annealing". Con base en lo anterior, se calculó la transferencia de masa cuyos resultados se observan en la TABLA 3. El porcentaje de masa transferida durante el proceso de "annealing" sufrido por el granate difiere de una muestra a otra, con valores que oscilan entre el 81.8% (muestra PCM-424) y el 5.2% (muestra PCM-420), sin que exista una correlación directa entre la misma y el grado de metamorfismo.

## INTERPRETACIÓN

Las CSDs del granate en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará tienen forma de campana y su análisis ha brindado valiosa información acerca de la historia de nucleación y crecimiento de este mineral metamórfico, lo cual junto con las estimaciones de las tasas de crecimiento, ha permitido establecer sus tiempos de crecimiento y tasas de nucleación. Aquí

se interpretan estas CSDs como el resultado de dos procesos: (1) condiciones iniciales de nucleación y crecimiento de los cristales y (2) pérdida tardía de los cristales de menor tamaño debido a "annealing". En muchos estudios se muestra que los minerales metamórficos se han formado exclusivamente bajo condiciones de nucleación y crecimiento continuos y que las CSDs son el resultado de cambios en la tasa de nucleación con el tiempo.

Los histogramas de frecuencia (FIGURA 6) y las CSDs (FIGURA 7) del granate en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará tienen una forma curva en lugar de lineal, similar a lo reportado en otros trabajos (p. ej., Kretz, 1966), en los cuales se han propuesto tres explicaciones para las formas de estas curvas: (1) un "modelo de probabilidad" en el que el tamaño de un cristal es controlado por el volumen circundante del cual es conducido material reactante; (2) todos los cristales nuclearon al mismo tiempo, pero crecieron a diferentes tasas (lo cual podría ocurrir, por ejemplo, si estos se sitúan en diferentes trayectorias de difusividad); (3) todos los cristales crecieron a la misma tasa, pero no nuclearon al mismo tiempo. Estos trabajos rechazan la primera explicación debido a la no correlación entre el tamaño del cristal y la distancia a los vecinos más cercanos. Kretz (1966) rechaza la segunda hipótesis con base en estudios sobre química del estado sólido, aunque algunos geólogos aún defienden una nucleación instantánea bajo ciertas condiciones. Las CSDs, así como la zonación química en granate, presentados en algunos trabajos (p. ej.,

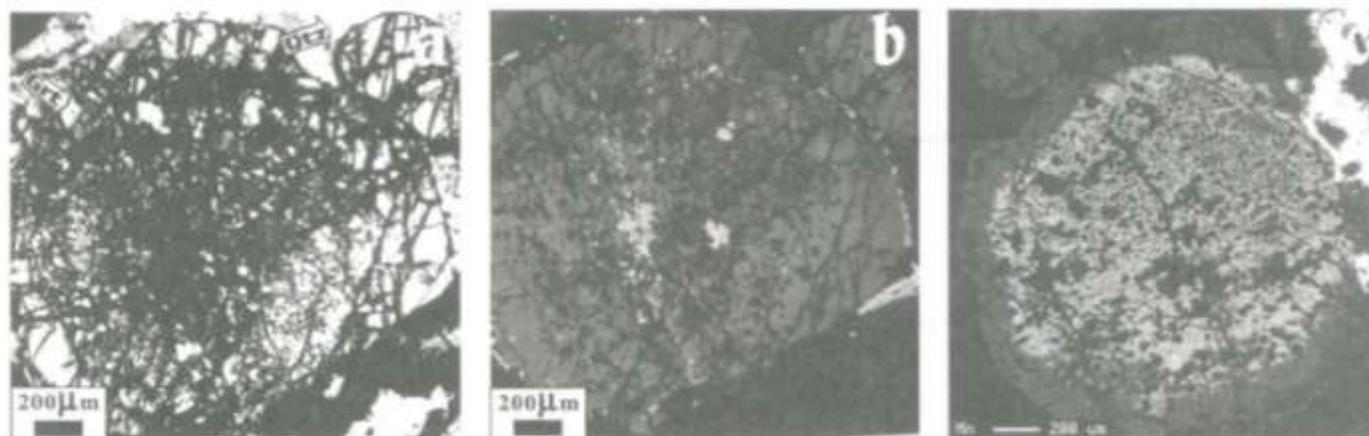


FIGURA 8. (a) Microfotografía de dos cristales de granate en la muestra PCM-420 (zona del granate-estaurolita), (b) imagen de electrones retrodispersados (BSE), y (c) mapa en escala de grises de la distribución de Mn.

Hollister, 1966), sugieren procesos de nucleación y crecimiento continuos de cristales a través del intervalo de cristalización, encontrándose así mismo un rango de distribución de tamaños de cristales de granate de manera que los cristales de menor tamaño son composicionalmente similares a los bordes de los cristales de mayor tamaño. En el caso particular de las rocas metapelíticas de la Formación Silgará, algo similar se observa en la muestra PCM-420, en la cual se analizó la composición química del granate (datos químicos tomados de Ríos, 1999). En la FIGURA 8 se ilustran tres imágenes de dos cristales de granate contiguos que ocurren en esta muestra: (a) microfotografía, (b) imagen de electrones retrodispersados (BSE), y (c) mapa en escala de grises de la distribución de Mn. En la FIGURA 8c los colores blanco y negro indican altas y bajas concentraciones de Mn, respectivamente.

Por otra parte, los perfiles de zonación química de estos dos cristales, los cuales se ilustran en la FIGURA 9, muestran cómo la distribución química de Fe ( $X_{alm}$ ) y Mn ( $X_{spn}$ ) en el cristal más pequeño es similar a aquella en los bordes del cristal más grande.  $X_{spn}$  en ambos cristales aumenta en el borde mientras que  $X_{alm}$  disminuye. Esta distribución química puede explicarse como producto de diferentes fases de crecimiento que ha tenido el granate, de tal manera que el núcleo del cristal más grande habría crecido antes que el cristal más pequeño, cuyo crecimiento sería contemporáneo con los bordes del cristal más grande.

El porfidoblasto de granate de mayor tamaño tiene inclusiones de cuarzo en su núcleo; posiblemente el granate sobrecreció la matriz de la roca, la cual en ese momento tenía un tamaño de grano mucho más fino. En una etapa posterior, la transferencia de masa en la matriz de la roca fue más efectiva, el granate creció sin inclusiones y los cristales de la matriz aumentaron de tamaño considerablemente.

Por lo tanto, Kretz (1966) favorece la tercera hipótesis mencionada con anterioridad, en la cual las CSDs están relacionadas a las variaciones en la tasa de nucleación con el tiempo, e interpreta el máximo en la curva de distribución como el tiempo de la máxima tasa de nucleación. No obstante, Cashman & Ferry (1988) proponen otra alternativa que explica la forma de la curva de la CSD para minerales en rocas que han sufrido metamorfismo regional: la CSD fue originalmente lineal, similar a aquella reportada para minerales en rocas que han sufrido metamorfismo de contacto, pero la distribución de tamaños de cristales fue posteriormente modificada por el efecto de "Ostwald ripening".

La interacción entre la tasa de nucleación y la tasa de crecimiento puede tener dos formas, dependiendo de la tasa de suministro de calor. Las CSDs pueden ser de dos tipos: exponencial, en las cuales la mayoría de cristales están concentrados en las fracciones más pequeñas, típica en rocas que han sufrido metamorfismo de contacto, reflejando un continuo aumento en la tasa de nucleación con el tiempo y

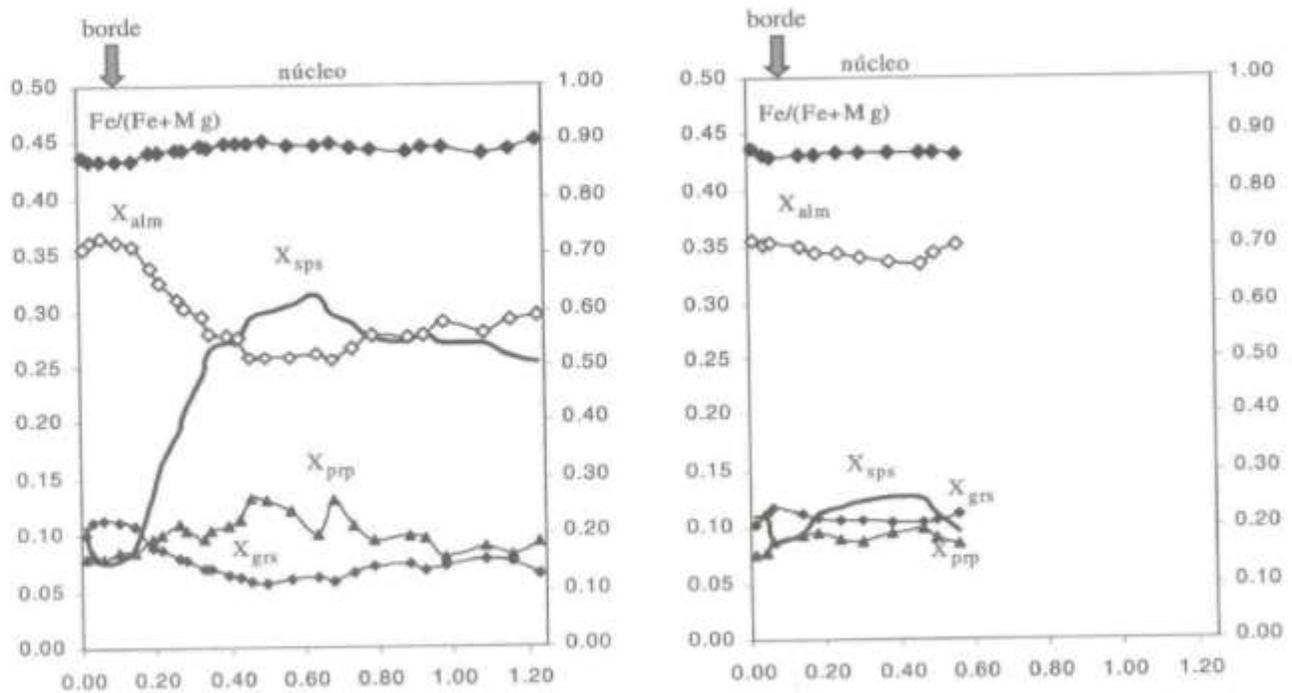


FIGURA 9. Perfiles de zonación del granate ilustrado en la FIGURA 8. El eje izquierdo indica los componentes  $X_{sps}$ ,  $X_{prp}$  y  $X_{grs}$ , mientras que el eje derecho indica la relación  $Fe/(Fe+Mg)$  y el componente  $X_{alm}$ . Diámetro en mm (eje inferior).

unimodal, típica en rocas que han sufrido metamorfismo regional. Según Waters & Lovegrove (1998), el segundo caso se explica como el resultado de los siguientes factores, los cuales podrían afectar la tasa de nucleación con el tiempo: (1) agotamiento de los sitios de nucleación; (2) gradientes de potencial químico alrededor de los cristales que crecen no permiten una nucleación adicional en su vecindad (significante si el transporte es lento); (3) ocurrencia de una reacción endotérmica que remueve calor de la roca y disminución del "overstepping" (significante si toda la tasa de reacción es rápida); (4) ocurrencia de una reacción multivariante sobre un intervalo de temperatura significativa y disminución del "overstepping" si la tasa de reacción supera el suministro de calor. Simulaciones computarizadas del proceso de nucleación y crecimiento muestran que el último factor tiene gran influencia, y que éste al parecer, más que el "Ostwald ripening", es la razón más probable para el predominio de CSDs de tipo unimodal en rocas que han sufrido metamorfismo regional.

Según Waters (1990), con una reacción multivariante, el "overstepping" depende tanto de la temperatura como del progreso de la reacción. En el caso del

granate, una reacción multivariante con un largo "overstepping" crítico explica las CSDs y los patrones de zonación química de este mineral en las rocas metamórficas de bajo y medio grado. El crecimiento inicial del granate ha ocurrido rápidamente a temperaturas cerca del "overstepping" crítico; el primer granate estaría fuertemente fuera del equilibrio y podría no registrar una partición sistemática de Fe-Mg con las fases minerales presentes en la matriz, por el contrario, la zonación química podría estar dominada por la partición de elementos menores tales como Mn y Ca. Es muy probable que en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará el granate que creció cerca de la isógrada del granate posiblemente estuviera dominado por este patrón de crecimiento. La tasa de nucleación disminuyó a medida que el progreso de la reacción que produjo granate reducía la cantidad de "overstepping". Posteriormente, el crecimiento del granate debió ser lento, teniendo lugar cerca al equilibrio, y manteniéndose con un aumento gradual de temperatura, con el fin de permitir una zonación por crecimiento, la cual registra cambios de Fe-Mg(-Mn).

Waters & Lovegrove (1998) establecieron que el parámetro b de la ecuación exponencial anteriormente

descrita corresponde a la aceleración inicial de la tasa de nucleación. Las CSDs ilustradas en la FIGURA 7 generalmente muestran un pico en la parte izquierda hacia menores tamaños de grano, con pocos cristales en las clases de mayor tamaño. Con respecto al parámetro  $b$ , los valores más altos corresponden a las muestras PCM-442 ( $b = 45.12$ ), PCM-424 ( $b = 46.702$ ), y PCM-441 ( $b = 125.51$ ), las cuales contienen numerosos cristales de granate de menor tamaño, sugiriendo una más fácil nucleación o una reacción más lenta, mientras que los valores más bajos corresponden a las muestras PCM-420 ( $b = 1.21$ ), PCM-386 ( $b = 15.656$ ), y PCM-389 ( $b = 18.964$ ), las cuales presentan pocos cristales de granate de mayor tamaño (p. ej., PCM-420), reflejando un calentamiento lento. Otro aspecto que puede destacarse aquí con relación a las CSDs (FIGURA 7) obtenidas para el granate que ocurre en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará es que una desviación corta en la parte izquierda a partir del punto de inflexión sugeriría, según Waters & Lovegrove (1998), que el granate se formó a partir de una reacción discontinua, mientras que una desviación larga sugeriría la formación de este mineral a partir de una reacción multivariante.

## REFERENCIAS

- Bell, T., and Rubenach, M. (1986). Sequential porphyroblast growth and crenulation cleavage development during progressive deformation. *Tectonophysics*, Vol. 92, pp. 171-194.
- Bell, T., Rubenach, M., and Fleming, P. (1986). Porphyroblast nucleation, growth and dissolution in regional metamorphic rocks as a function of deformation partitioning during foliation development. *Journal of Metamorphic Geology*, Vol. 4, pp. 37-67.
- Cameron, H. (1999). Structural and Metamorphic History of the Murphy Syncline, North Carolina, and Effects of Structural Processes on the Kinetics of Porphyroblast Nucleation and Growth. PhD Project Proposal. Department of Earth Sciences. James Cook University. [http://www.es.jcu.edu.au/personal/holmes/cam\\_prop.html](http://www.es.jcu.edu.au/personal/holmes/cam_prop.html).
- Carlson, W., Denison, C., and Ketchum, R. (1995). Controls on the nucleation and growth of porphyroblasts: kinetics from natural textures and numerical models. *Geological Journal*, Vol. 30, pp. 207-225.
- Cashman, K., and Marsh, B. (1988). Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization. II. Makaopuhi lava lake. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 99, pp. 292-305.
- Cashman, K., and Ferry, J. (1988). Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization. III. Metamorphic crystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 99, pp. 401-415.
- Chinner, G. (1966). The distribution of pressure and temperature during Dalradian metamorphism. *Geological Society of London Quarterly Journal*, Vol. 122, pp. 159-186.
- Ferry, J. (1980). A case study of the amount and distribution of heat and fluid during metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 71, pp. 373-385.
- Grambling, J. (1981). Kyanite, andalusite, sillimanite, and related mineral assemblages in the Truchas Peaks region, New México. *American Mineralogist*, Vol. 66, pp. 702-722.
- Hollister, L. (1966). Garnet zoning: an interpretation based on the Rayleigh fractionation model. *Science*, Vol. 154, pp. 1647-1651.
- Kirkpatrick, R. (1977). Nucleation and growth of plagioclase, Makaopuhi and Alae lava lakes, Kilauea Volcano, Hawaii. *Geological Society American Bulletin*, Vol. 88, pp. 78-84.
- Kretz, R. (1966). Grain-size distribution for certain metamorphic minerals in relation to nucleation and growth. *Journal of Geology*, Vol. 74, pp. 147-173.
- Kretz, R. (1983). Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, Vol. 68, pp. 277-279.

Marsh, B. (1988). Crystal size distributions (CSDs) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization. I. Theory. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 99, pp. 277-291.

Miyashiro, A. (1994). *Metamorphic Petrology*. 1st edition. UCL Press Limited, London, 404p.

Ríos, C. (1999). Chemical Compositions of the Constituent Minerals and P-T Conditions of the Low-grade Silgará Formation Metamorphic Rocks in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. MSc Tesis, Shimane University, Matsue (Japan), 207p.

Ríos, C., y García, C. (2001). Primera ocurrencia de los tres polimorfos de  $Al_2SiO_5$  en las rocas metapelíticas de la Formación Silgará, región suroccidental del Macizo de Santander. *Boletín de Geología UIS*, Vol. 23, N° 38, pp. 51-59.

Spear, F. (1993). *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*. Mineralogical Society of America MONOGRAPH SERIES, Washington, DC, 799p.

Spear, F., and Daniel, C. (1998). Garnet growth in the garnet zone. *Geological Materials Research*, 1, (<http://gmr.minsocam.org>).

Wagner, C. (1961). A note on the origin of ophitic texture in the chilled olivine gabbro of the Skaergaard intrusion. *Geological Magazine*, Vol. 98, pp.353-366.

Walther, J., and Wood, B. (1984). Rate and mechanism in prograde metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Vol. 88, pp. 246-259.

Waters, D. (1990). Nucleation and overstepping in prograde metamorphic reactions: implications for overall reaction rates and crystal size distributions. Abstract from a presentation at a conference on textures in metamorphic rocks in Manchester. Department of Earth Sciences, University of Oxford, Parks Road, Oxford OX1 3PR.

Waters, D., and Lovegrove, D. (1998). Microstructures of metamorphic rocks. A study of the nucleation and growth of metamorphic reaction products using information contained in crystal size distributions. <http://www.earth.ox.ac.uk/~davewa/research/kinpost.html>.

Wood, B., and Walther, J. (1983). Rates of hydrothermal reactions. *Science*, Vol. 222, pp. 413-415.

---

Trabajo recibido: marzo 12 de 2002  
Trabajo aceptado: agosto 13 de 2003