



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Apuntes de termodinámica
aplicada a las Ciencias de la
Tierra: Diagramas de fases
de sistemas magmáticos**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Laura Martínez Martínez

ASESORA DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dra. Laura Mori



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

ÍNDICE

SOBRE EL TRABAJO DE APOYO A LA DOCENCIA

1. Introducción	1
2. El comportamiento de los magmas durante la cristalización	2
3. La regla de las fases de Gibbs	4
4. Sistemas magmáticos de un componente	6
5. Sistemas magmáticos de dos componentes (binarios).....	7
5.1. Sistemas binarios con solución sólida	8
5.1.1. El sistema albita-anortita	8
5.1.2. El sistema fayalita-forsterita	11
5.2. Sistemas binarios con eutéctico: el sistema diópsido-anortita	13
6. Sistemas magmáticos de tres componentes (ternarios)	17
6.1. Sistemas ternarios con eutéctico: el sistema diópsido-anortita- forsterita.....	17
7. Conclusiones	23
8. Referencias.....	24
9. Autoevaluación	25
10. Autoevaluación (soluciones).....	27

SOBRE EL TRABAJO DE APOYO A LA DOCENCIA

El presente material didáctico, “Apuntes de termodinámica aplicada a las Ciencias de la Tierra: Diagramas de fases de sistemas magmáticos”, forma parte de la modalidad de “Titulación por actividad de apoyo a la docencia” para obtener el título de Ingeniera Geóloga.

Estos apuntes conformarán el capítulo 13 del libro digital “Termodinámica para Ciencias de la Tierra: fundamentos y aplicaciones” que se está generando en el marco del proyecto DGAPA-PAPIME 101971, cuyos responsables son el Dr. Soto Ayala y el Ing. Arellano Gil, y en el cual participa como directora del trabajo escrito la Dra. Mori.

El libro digital “Termodinámica para Ciencias de la Tierra: fundamentos y aplicaciones” permitirá contrastar y reducir el alto índice de deserción y reprobación de las asignaturas de Termodinámica y Fundamentos de Termodinámica que se imparten en las carreras de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (DICT), ya que, por un lado facilitará la comprensión de conceptos teóricos fundamentales, y por otra parte permitirá visualizar de manera directa la estrecha relación que la termodinámica guarda con las Ciencias de la Tierra, fomentando el interés de los alumnos hacia la disciplina, y motivándolos en el estudio.

En específico, el material didáctico se enfoca a explicar de qué manera la termodinámica puede ayudar a entender los procesos de cristalización magmática. Se ha realizado un trabajo de revisión de los libros de texto más actualizados sobre el tema (todos en idioma inglés), una integración de la información recabada, y se ha redactado este material de una forma sintética, en el idioma español, procurando emplear un lenguaje claro y sencillo para fomentar una comprensión inmediata de los conceptos. El texto se acompaña de fotografías e imágenes muy didácticas que simplifican su entendimiento. Asimismo, al final del trabajo escrito se presenta un cuestionario de autoevaluación acompañado con las respectivas soluciones, gracias al cual los alumnos podrán valorar su comprensión del tema.

Aunque el recurso didáctico que se ha generado está dirigido principalmente a estudiantes de los primeros semestres de las carreras de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, podrá beneficiar también a alumnos de semestres más avanzados. Por ejemplo,

los estudiantes de Petrología Ígnea y Metamórfica podrán utilizarlo como material básico de referencia a partir del cual profundizar y comprender conceptos progresivamente más complejos.

1. Introducción

La termodinámica es una disciplina fundamental para el estudio de los sistemas ígneos, ya que permite determinar qué minerales se formarán a partir de un magma, dependiendo de su composición química y de las condiciones ambientales en las que ocurre el enfriamiento; así como reconstruir las condiciones de generación de una roca ígnea, conociendo el tipo y la composición de los minerales que la conforman (Best, 2003; Gill, 2010; Winter, 2014).

Los diagramas de fases de sistemas magmáticos son representaciones gráficas de las relaciones de equilibrio que existen entre minerales y fundidos, las cuales son gobernadas por las leyes de la termodinámica. Al ilustrar cómo cambian las fases de un sistema magmático en función de la temperatura, la presión, la composición o una combinación de estas variables, dichos diagramas representan una herramienta fundamental para entender la dinámica de la cristalización magmática y los principales factores que la controlan (Best, 2003; Gill, 2010; Winter, 2014).

En este capítulo llevaremos a cabo un análisis termodinámico del proceso de cristalización de sistemas magmáticos simplificados, como análogos de sistemas naturales más complejos. En específico, analizaremos las reacciones que se llevan a cabo entre fundido y minerales durante el enfriamiento de sistemas experimentales de uno, dos y tres componentes; y veremos cómo, al ser transferidas al mundo real, las conclusiones extraídas de dichos experimentos nos ayudan a predecir el comportamiento y la evolución de los sistemas magmáticos naturales durante la cristalización.

2. El comportamiento de los magmas durante la cristalización

Entre los años 1965 y 1969, los petrólogos Wright y Okamura estudiaron el proceso de cristalización del lago de lava basáltica Makaopuhi, en Hawái (figura 1). Los investigadores perforaron la delgada costra rocosa del lago de lava, y tomaron muestras del magma subyacente por medio de sondas de acero inoxidable y cerámica. Considerando que el magma en el cráter del volcán se enfría desde la superficie hacia abajo, al insertar la sonda a mayor profundidad se pudieron tomar muestras de magma progresivamente más calientes. También se insertaron termopares en los orificios perforados, para determinar el gradiente de temperatura en el magma y estimar la temperatura de cada muestra. De esta forma se obtuvieron varias muestras de magma recolectadas en un rango de temperaturas conocidas.



Figura 1. Fotografía panorámica del cráter Makaopuhi, en Hawái, el cual actualmente está cubierto de rocas basálticas de color gris oscuro derivadas de la completa solidificación de un lago de lava. Imagen tomada de <https://www.wikiloc.com/hiking-trails/trail-to-napau-crater-195960/photo-36412>.

Una vez extraídas, las muestras de magma se enfriaron de manera extremadamente rápida, por lo que no tuvieron la posibilidad de formar cristales; más bien, las muestras se “congelaron” formando un vidrio (una fase sólida amorfa en la cual los átomos no presentan ningún ordenamiento). Los cristales que ya estaban presentes en las muestras de magma al momento de la recolección permanecieron englobados en el vidrio recién formado.

Las rocas ígneas derivadas de la solidificación de las diferentes muestras de magma fueron sometidas a estudios petrográficos y análisis químicos. Los resultados de la investigación de Wright y Okamura (1977), mostraron que la cantidad de vidrio en las rocas (representativa de la cantidad de líquido magmático presente al momento de la recolección) disminuye del 100% al 0% en un rango de temperaturas entre ~1200 y ~950 °C, paralelamente a un progresivo aumento de la cantidad de cristales; a medida que el magma se enfría, cristaliza primero el olivino, seguido por el piroxeno y finalmente por la plagioclasa; durante el progresivo enfriamiento del magma, el olivino y el piroxeno se enriquecen en Fe, las plagioclasas se enriquecen en Na, mientras que el vidrio se empobrece en Mg y Ca.

Las situaciones en las que podemos monitorear el comportamiento de un magma natural durante la cristalización son extremadamente raras. Por esta razón, nuestra comprensión de los procesos de cristalización magmática deriva principalmente de experimentos de laboratorio en los cuales se funden agregados minerales en condiciones de temperatura y presión controladas, y se enfrían progresivamente los líquidos magmáticos así obtenidos, para investigar cómo procede la cristalización y cuáles son los parámetros principales que la gobiernan (Gill, 2010).

Al integrar la información obtenida del análisis de sistemas ígneos naturales con los datos experimentales, se pueden hacer las siguientes observaciones generales sobre el comportamiento de los magmas durante la cristalización (Winter, 2014 y referencias incluidas):

1. El proceso de cristalización magmática ocurre en un rango de temperaturas.
2. Durante la cristalización, el líquido magmático experimenta continuos cambios de composición.
3. A medida que avanza el enfriamiento, diferentes tipos de minerales cristalizan en un orden secuencial, por lo general con una superposición considerable.
4. El número de minerales tiende a aumentar conforme disminuye la temperatura.
5. A medida que avanza el enfriamiento, los minerales que son soluciones sólidas (por ejemplo, olivino, piroxeno y plagioclasa) experimentan continuos cambios de composición.

6. El tipo y la composición de los minerales que cristalizan, así como la secuencia en la que se forman, dependen de la temperatura y de la composición inicial del magma. La complejidad química de los sistemas magmáticos naturales hace que sea extremadamente difícil monitorear de manera simultánea el efecto que tienen sus numerosas variables composicionales en el proceso de cristalización. Por esta razón, los petrólogos suelen estudiar sistemas experimentales simplificados, que les permiten enfocarse a componentes químicos y minerales específicos, y analizar su comportamiento durante la cristalización. En este trabajo analizaremos algunos de estos sistemas químicos simplificados, los cuales nos ayudarán a entender mejor los aspectos clave de la cristalización magmática.

3. La regla de las fases de Gibbs

En el transcurso de este texto, analizaremos algunos sistemas magmáticos simplificados, con el objetivo de comprender la dinámica de cada uno, y la contribución de cada constituyente químico a dichas dinámicas. Si logramos entender cuál es el efecto de añadir constituyentes adicionales a un sistema magmático, podremos entender sistemas experimentales progresivamente más complejos, y acercarnos más a la comprensión de los sistemas ígneos naturales. La regla de las fases de Gibbs es una ecuación sencilla que nos ayudará a alcanzar este objetivo. Sin embargo, antes de enunciarla, es conveniente repasar algunos conceptos fundamentales:

- Un sistema es una parte del universo que pretendemos estudiar; por ejemplo, un sistema podría ser una muestra de magma sometida a un experimento de equilibrio entre fases.
- Para poder estudiar un sistema necesitamos definir su estado, es decir, proporcionar una descripción completa de sus propiedades (en el caso de sistemas magmáticos las propiedades principales son la presión, la temperatura y la composición).
- Una fase es una parte de un sistema que presenta propiedades físicas y químicas uniformes, que permiten distinguirla de otras partes del sistema; puede ser líquida, como un fundido magmático, o sólida, como un mineral.

- Los componentes de un sistema son el número mínimo de especies químicas necesarias para describir la composición de todas las fases del sistema. Un mineral compuesto de una fase pura, como el cuarzo, es un sistema de un único componente (SiO_2); mientras que los minerales que son soluciones sólidas entre sustancias puras, o las rocas conformadas por diferentes tipos de minerales, son sistemas multicomponentes. Por ejemplo, dado que la plagioclasa es una solución sólida entre los minerales puros albita (Ab) y anortita (An), su composición está definida por los componentes Ab ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y An ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) involucrados en la mezcla, y se indica especificando las proporciones relativas de cada uno (figura 2).



Figura 2. La plagioclasa es una solución sólida entre los minerales puros albita y anortita. Una plagioclasa de composición An_{30} está compuesta por el 30% del componente anortita y por el 70% del componente albita. Imagen tomada de <https://www.flickr.com/photos/udgeology/2315101335>.

La regla de las fases de Gibbs permite conocer la varianza, o número de grados de libertad de un sistema, es decir, el número mínimo de variables independientes que se tienen que especificar para poder constreñir las otras variables dependientes, y así definir de manera completa el estado de un sistema en equilibrio. La regla de las fases establece que $F = C - \phi + r$, donde F es la varianza del sistema, C es el número de componentes del sistema, ϕ es el número de fases y r es el número de variables ambientales (dado que las variables ambientales más importantes son presión y temperatura, por lo general $r = 2$; sin embargo, en sistemas isobáricos la temperatura es la única variable ambiental, por lo que $r = 1$). La regla de las fases de Gibbs indica que, por cada componente que se agregue a un sistema, la varianza aumenta de uno, por lo que se debe especificar una variable adicional para constreñir de manera completa el estado del sistema. Por otra parte, por cada fase adicional, la varianza disminuye en uno, es decir, hay una variable menos por especificar. Una vez que se determine el número mínimo de variables

independientes de un sistema, todas las otras variables se pueden determinar de manera automática, y el sistema está completamente definido.

4. Sistemas magmáticos de un componente

La figura 3 ilustra el diagrama de fases presión-temperatura (P-T) para el sistema de la sílice (SiO_2) (Best, 2003; Winter, 2014). El diagrama incluye una fase líquida (SiO_2 fundida) y una serie de fases sólidas (minerales polimorfos de SiO_2) que son estables en diferentes condiciones de presión y temperatura.

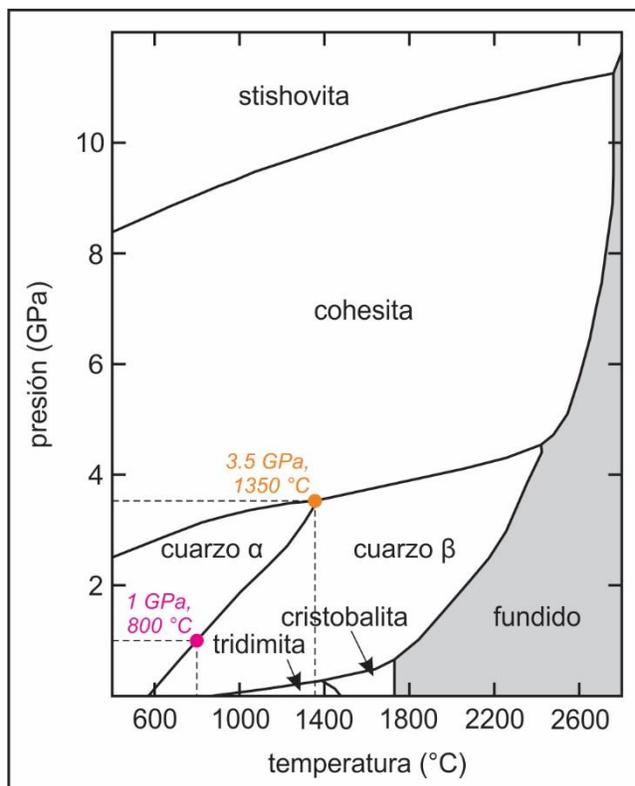


Figura 3. Diagrama de fases P-T de SiO_2 .
Imagen modificada de Winter (2014).

Los sistemas que se encuentran en el campo de estabilidad de una fase, ya sea sólida o líquida, son divariantes ($C = 1$, $\phi = 1$ y $r = 2$, por lo que $F = 1 - 1 + 2 = 2$): esto significa que, para definir el estado de cualquier sistema de un componente y monofásico, es necesario especificar tanto las condiciones de presión como de temperatura. En cambio, las curvas que separan los diferentes campos de estabilidad, que representan las

condiciones P-T bajo las cuales dos fases coexisten en equilibrio, son univariantes ($C = 1$, $\phi = 2$ y $r = 2$, por lo que $F = 1 - 2 + 2 = 1$): esto significa que, para definir el estado de cualquier sistema de un componente y bifásico, es suficiente especificar solo uno de los parámetros ambientales (ya sea presión o temperatura), pues el otro se obtiene automáticamente a partir de la ubicación del sistema en la curva de equilibrio. Por ejemplo, para conocer a qué temperatura coexisten cuarzo α y cuarzo β a una presión de 1 GPa, es suficiente proyectar el punto de la curva de equilibrio cuarzo α -cuarzo β correspondiente a la presión de 1 GPa sobre el eje x del diagrama, y leer el valor de la temperatura (800 °C; figura 3). Finalmente, los puntos de encuentro de las curvas univariantes, que representan las condiciones P-T bajo las cuales tres fases coexisten en equilibrio, son invariantes ($C = 1$, $\phi = 3$ y $r = 2$, por lo que $F = 1 - 3 + 2 = 0$): esto significa que, para definir el estado de un sistema de un componente y trifásico, no es necesario especificar ningún parámetro ambiental, pues solo existe un conjunto de condiciones de presión y temperatura en el cual las tres fases consideradas se encuentran en equilibrio. Por ejemplo, la coexistencia en equilibrio de cuarzo α , cuarzo β y cohesita indica de manera unívoca unas condiciones de $P = 3.5$ GPa y $T = 1350$ °C (figura 3).

5. Sistemas magmáticos de dos componentes (binarios)

Cuando se agrega un segundo componente a un sistema, este puede interactuar con el primero de varias formas. En esta parte del trabajo, analizaremos los dos tipos más comunes de sistemas magmáticos binarios: los que involucran dos componentes completamente miscibles en el estado sólido (sistemas binarios con solución sólida) y los que involucran dos componentes inmiscibles en el estado sólido (sistemas binarios con eutéctico).

Aplicando la regla de las fases de Gibbs a un sistema binario monofásico, este resultaría trivariante ($C = 2$, $\phi = 1$ y $r = 2$, así que $F = 2 - 1 + 2 = 3$), por lo que sería necesario especificar tres variables independientes (presión, temperatura y una variable composicional) para definir su estado. De acuerdo con esta consideración, los sistemas binarios deberían representarse en diagramas tridimensionales. Para evitar este tipo de

representaciones relativamente complejas, el comportamiento de los sistemas magmáticos binarios suele ilustrarse en diagramas de fases temperatura-composición (T-X) construidos experimentalmente en condiciones de presión constante. Al fijar la presión, $r = 1$, por lo que la varianza de un sistema binario monofásico se reduciría de uno.

5.1. Sistemas binarios con solución sólida

5.1.1. El sistema albita-anortita

La plagioclasa es una solución sólida entre dos componentes puros completamente miscibles, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ y $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, por lo que representa un excelente ejemplo de sistema magmático binario con solución sólida. La figura 4 ilustra el diagrama de fases T-X para el sistema $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, determinado a la presión constante de 0.1 MPa (presión atmosférica) (Best, 2003; Gill, 2010; Frost y Frost, 2014; Winter, 2014; Gill, 2015).

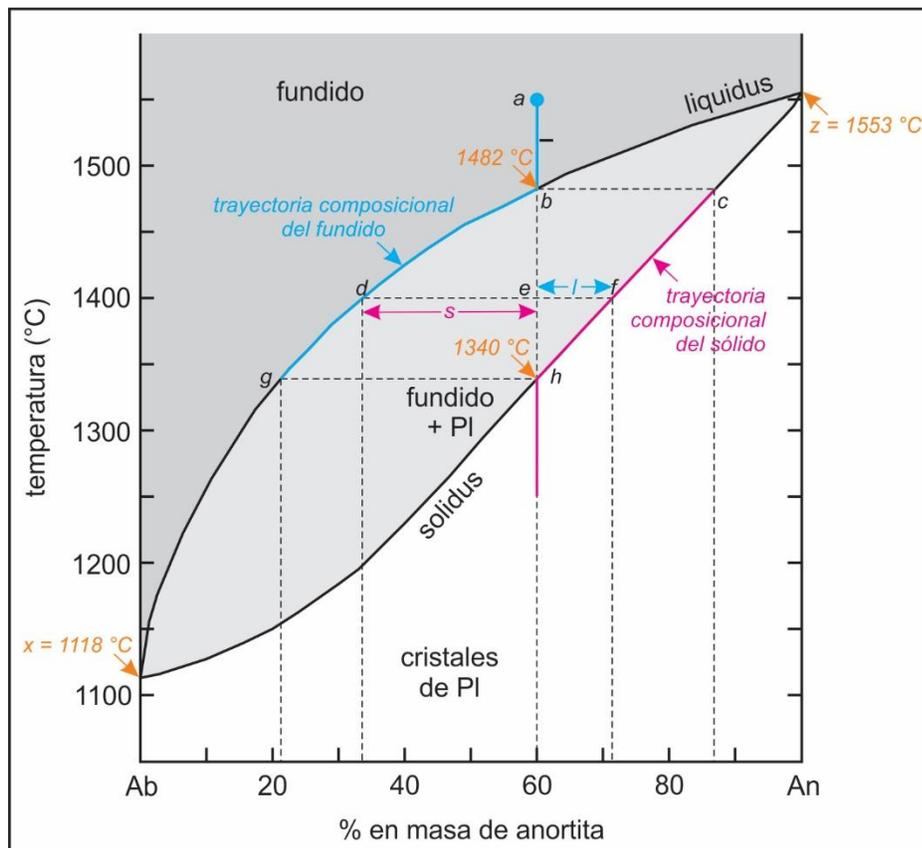


Figura 4. Diagrama de fases T-X para el sistema albita-anortita, construido a presión atmosférica (0.1 MPa). Imagen modificada de Winter (2014).

En el diagrama se reconocen tres campos: un campo de alta temperatura en correspondencia del cual la plagioclasa está completamente fundida; un campo intermedio en el cual la fase fundida coexiste con una fase sólida; y un campo de baja temperatura en el cual la plagioclasa es estable como sólido cristalino. El campo de estabilidad “fundido + Pl” está delimitado por dos curvas que se encuentran en los puntos x (temperatura de cristalización de la albita pura) y z (temperatura de cristalización de la anortita pura): la curva superior, denominada liquidus, indica las condiciones de temperatura en correspondencia de las cuales fundidos de diferente composición empiezan a cristalizar; mientras que la curva inferior, denominada solidus, señala las condiciones de temperatura en correspondencia de las cuales se completa el proceso de cristalización.

En cada extremo del eje horizontal del diagrama se encuentra un sistema de un componente representado por un término puro de la solución sólida: Ab a la izquierda y An a la derecha (figura 4). Cada uno de estos sistemas se comporta como un típico sistema isobárico de un componente en el cual el fundido cristaliza a una temperatura definida, en correspondencia de la cual coexiste con la fase mineral. Los puntos x y z del diagrama son invariantes ($F = C - \phi + r = 1 - 2 + 1 = 0$): es decir, en las condiciones de presión especificadas, la albita pura cristaliza a una temperatura fija de 1118 °C, mientras que la anortita pura cristaliza a 1553 °C.

Examinemos ahora qué efecto tiene la adición de un componente sobre el proceso de cristalización, analizando el comportamiento de un fundido de composición intermedia entre Ab y An sometido a un enfriamiento. En específico, consideremos el proceso de enfriamiento de un fundido de composición An₆₀ (fundido compuesto por el 60% de anortita) que presenta una temperatura inicial de 1550 °C (punto a de la figura 4). En el punto a el sistema es divariante ($F = C - \phi + r = 2 - 1 + 1 = 2$): esto significa que, para definir de manera completa el estado del sistema, es necesario especificar tanto las condiciones de temperatura (en este caso 1550 °C) como una variable composicional (en este caso el porcentaje de anortita, An₆₀). Al definir la variable composicional An₆₀, la otra variable composicional del sistema binario es automáticamente determinada (la albita debe representar el restante 40% de la masa del sistema).

Si enfriamos el sistema hasta una temperatura de 1482 °C, el fundido empieza a cristalizar (figura 4), por lo que la fase líquida empieza a coexistir con una fase sólida. En el campo de estabilidad “fundido + Pl” el sistema es univariante ($C = 2$, $\phi = 2$ y $r = 1$, por lo que $F = 2 - 2 + 1 = 1$), es decir, solo se necesita especificar una variable (ya sea T o la composición de una de las dos fases coexistentes) para determinar automáticamente las otras y así definir el estado del sistema. Por ejemplo, si especificamos la variable temperatura ($T = 1482$ °C), podemos trazar en el diagrama una línea horizontal correspondiente a dicho valor de temperatura, la cual intersecta el liquidus y el solidus en los puntos b y c, respectivamente (figura 4). El segmento b-c se denomina “línea de enlace”, ya que une o “enlaza” la composición de dos fases coexistentes. Proyectando los puntos b y c sobre el eje composicional del diagrama, se puede conocer la composición del fundido (punto b, An_{60}) y del sólido cristalino (punto c, An_{87}) que coexisten en equilibrio a la temperatura considerada.

La regla de las fases de Gibbs nos permite inferir entonces que, cuando en un sistema binario isobárico coexisten dos fases, la composición de ambas es una función de la temperatura, y se puede determinar a partir de las curvas de liquidus y de solidus trazando una línea de enlace. Esto también implica que, durante el enfriamiento (es decir, conforme disminuye la temperatura), tanto el fundido como la plagioclasa coexistente experimentan continuos cambios composicionales. De hecho, si seguimos enfriando el sistema, podemos observar que la composición del fundido se desplaza a lo largo del liquidus desde b hacia el punto g, mientras que la composición de la plagioclasa se desplaza a lo largo del solidus desde c hacia el punto h (figura 4). El cambio de composición de las dos fases ocurre a través de la reacción $\text{fundido}_1 + \text{plagioclasa}_1 = \text{fundido}_2 + \text{plagioclasa}_2$, por medio de la cual el sólido y el líquido intercambian componentes. Durante el enfriamiento, tanto el fundido como la plagioclasa se enriquecen progresivamente en el componente sódico (Ab); sin embargo, el mineral contiene siempre un mayor porcentaje de componente cálcico (An) respecto al líquido coexistente, debido a que Ca es más refractario que Na y se concentra preferentemente en la fase sólida.

Además de determinar la composición de las dos fases que coexisten a cierta temperatura, las líneas de enlace permiten calcular también sus proporciones relativas.

Por ejemplo, a una temperatura de 1400 °C, la línea de enlace d-f conecta un líquido d de composición An₃₄ con un sólido f de composición An₇₁; el punto e indica la composición global del sistema (An₆₀; figura 4). El porcentaje de líquido y de sólido que coexisten a la temperatura considerada se calcula geoméricamente a partir de la regla de la palanca, según la cual las cantidades relativas de cada fase (d y f) deben equilibrarse en el punto de apoyo, representado por el punto e (figuras 4 y 5): % fundido = $100 * l / (l + s)$; % cristales = 100 - % fundido. Considerando que $s = e - d = 60 - 34 = 26$, y $l = f - e = 71 - 60 = 11$ (figuras 4 y 5), se obtiene que, a una temperatura de 1400 °C, el sistema está conformado por el ~30% de fundido y el ~70% de cristales.



Figura 5. La regla de la palanca permite determinar el porcentaje de las fases d y f de un sistema de composición global e, que coexisten en equilibrio a 1400 °C.

A medida que el sistema se sigue enfriando, la cantidad de sólido aumenta progresivamente a expensas de la cantidad de fundido. Cuando la temperatura del sistema alcanza los 1340 °C la cristalización es prácticamente completa (figura 4); la plagioclasa h, de composición análoga a la composición global del sistema (An₆₀), coexiste con una última fracción de fundido (g) de composición An₂₁. Justo por debajo de los 1340 °C la fase fundida desaparece, así que la única fase estable es un sólido representado por una plagioclasa de composición An₆₀. En el campo de estabilidad de la plagioclasa el sistema es divariante ($F = C - \phi + r = 2 - 1 + 1 = 2$), por lo que se debe especificar tanto la temperatura como una variable composicional (An₆₀) para definir su estado.

5.1.2. El sistema fayalita-forsterita

El olivino es otro ejemplo de sistema binario con características y comportamiento análogo al de la plagioclasa. El olivino es una solución sólida entre dos componentes puros completamente miscibles, Fe₂SiO₄ y Mg₂SiO₄, correspondientes a los minerales fayalita (Fa) y forsterita (Fo) (figura 6). La figura 7 ilustra el diagrama de fases T-X para

el sistema $\text{Fe}_2\text{SiO}_4\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$, determinado a la presión constante de 0.1 MPa (Gill, 2010; Frost y Frost, 2014; Sen, 2014; Winter, 2014; Gill, 2015).

Un fundido de composición Fo_{55} y con una temperatura inicial de 1800 °C (punto a del diagrama) empezará a cristalizar a 1700 °C (punto b), produciendo un primer mineral de composición c (Fo_{83}); y cristalizará por completo a 1470 °C (punto e), una vez consumida la última fracción de líquido de composición d (Fo_{22}). Durante el progresivo enfriamiento, tanto el fundido como el olivino se enriquecen en el componente Fa; sin embargo, el mineral contiene siempre un mayor porcentaje del componente magnesiano (Fo) respecto al líquido coexistente debido a que, por su menor tamaño, Mg logra formar un enlace más fuerte en la fase sólida y se concentra preferentemente en ella.



Figura 6. El olivino es una solución sólida entre los minerales puros fayalita (Fe_2SiO_4) y forsterita (Mg_2SiO_4). Imagen tomada de <http://www.geologypage.com/wp-content/uploads/2014/03/Forsterite3.jpg>.

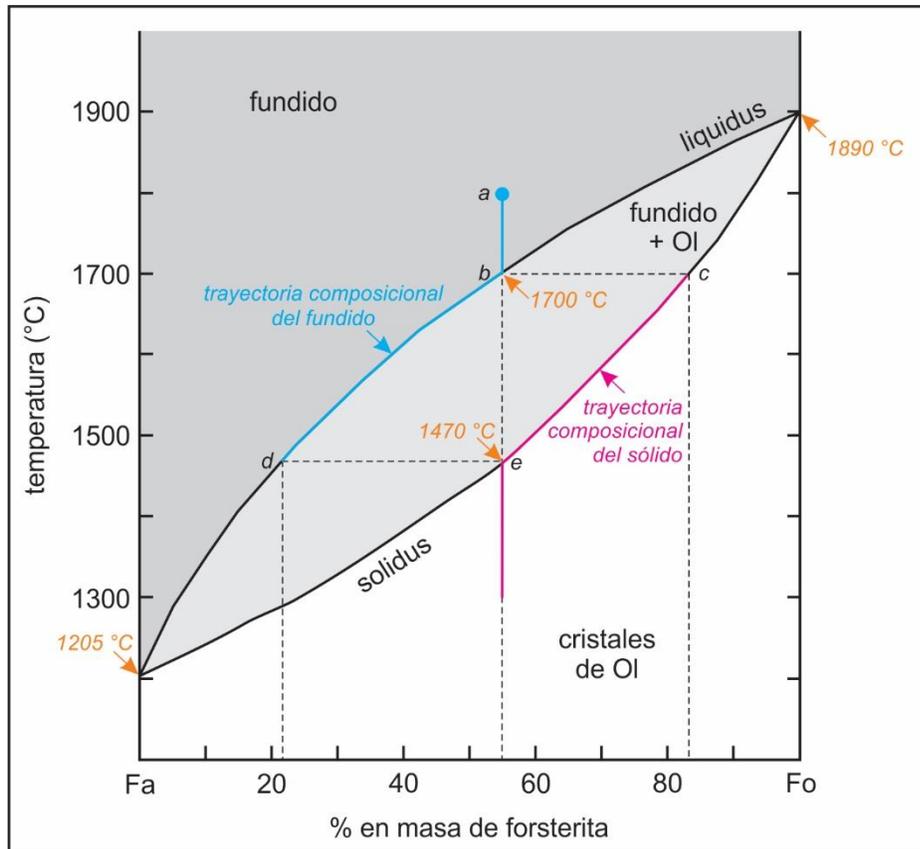


Figura 7. Diagrama de fases T-X para el sistema fayalita-forsterita, construido a presión atmosférica (0.1 MPa). Imagen modificada de Sen (2014) y Winter (2014).

5.2. Sistemas binarios con eutéctico: el sistema diópsido-anortita

En algunos sistemas magmáticos binarios los dos componentes no presentan una solución sólida. Como ejemplo de un sistema binario sin solución sólida analizaremos el sistema diópsido-anortita (Di-An, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), el cual representa un análogo simplificado de un sistema basáltico/gabroico natural conformado por piroxeno (grupo al que pertenece el diópsido) y plagioclasa (figura 8).



Figura 8. El gabro es una roca ígnea compuesta de piroxeno (cristales negros) y plagioclasa (cristales blancos). Imagen tomada de <https://www.sandatlas.org/gabbro/>.

El sistema se ilustra en la figura 9, en un diagrama de fases T-X construido a presión atmosférica (Best, 2003; Gill, 2010; Frost y Frost, 2014; Sen, 2014; Winter, 2014; Gill, 2015).

En el diagrama se reconocen cuatro campos: un campo de alta temperatura en el cual es estable una fase líquida (diópsido y anortita son completamente miscibles en el estado fundido); dos campos intermedios en correspondencia de los cuales la fase fundida coexiste con una fase sólida (puede ser diópsido o anortita, dependiendo de la composición del sistema); y un campo de baja temperatura en el cual es estable una asociación de diópsido y anortita cristalinos. La curva que separa el campo de estabilidad de la fase fundida de los campos “fundido + Di” y “fundido + An” representa el liquidus; mientras que la recta que separa los campos “fundido + Di” y “fundido + An” del campo “cristales de Di + An” es el solidus. El liquidus y el solidus se encuentran en el punto f, denominado eutéctico.

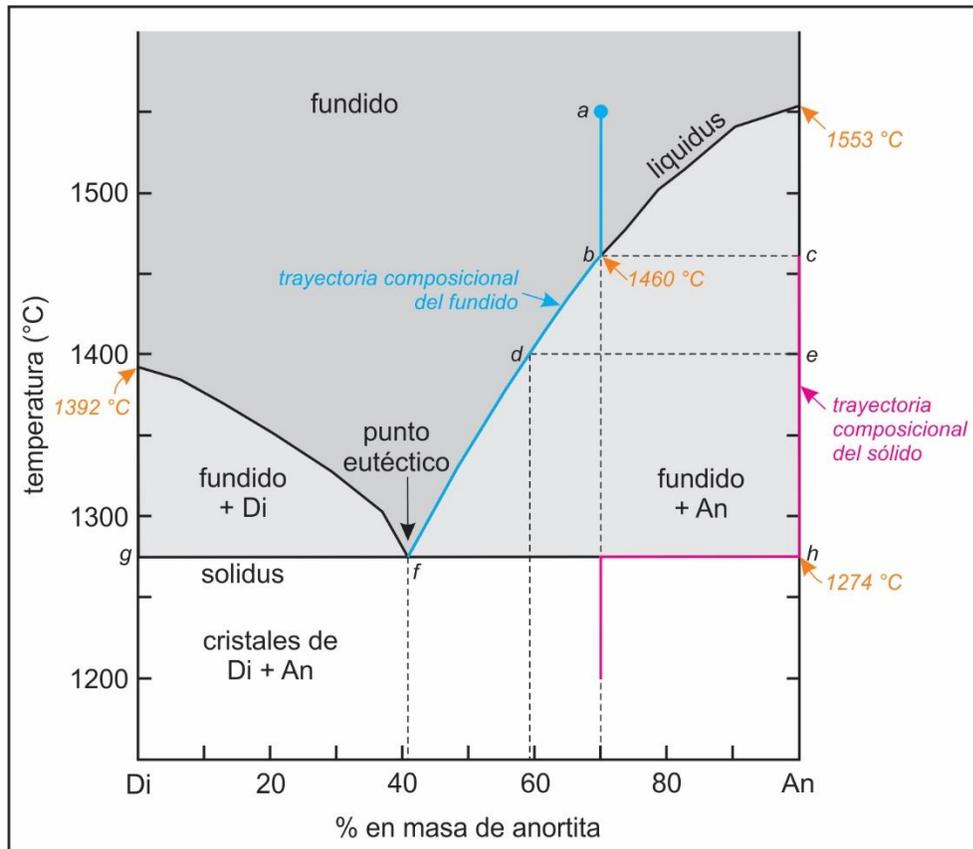


Figura 9. Diagrama de fases T-X para el sistema dióxido-anortita, construido a presión atmosférica (0.1 MPa). Imagen modificada de Sen (2014) y Winter (2014).

Analicemos el proceso de enfriamiento de un fundido magmático de composición An_{70} (una mezcla conformada por el 70% de anortita y el 30% de dióxido) que presenta una temperatura inicial de 1550 °C (punto a de la figura 9). En el punto a el sistema es divariante ($F = C - \phi + r = 2 - 1 + 1 = 2$), por lo que es necesario especificar tanto la temperatura (en este caso 1550 °C) como una variable composicional (por ejemplo, el porcentaje de An que contiene, An_{70}) para definir su estado.

Cuando alcanza una temperatura de ~1460 °C, el sistema empieza a cristalizar (figura 9), por lo que la fase fundida (b) empieza a coexistir con anortita pura (c). En el campo de estabilidad “fundido + An” el sistema es univariante ($F = C - \phi + r = 2 - 2 + 1 = 1$), es decir, se necesita especificar una sola variable para determinar automáticamente las otras. Por ejemplo, si fijamos la variable temperatura a 1400 °C, trazamos en el diagrama la línea de enlace correspondiente (d-e), y proyectamos el punto d del liquidus sobre el eje composicional del diagrama, obtenemos la composición del fundido (d) que coexiste con la anortita (e) a la temperatura considerada: An_{59} (figura 9).

Conforme el sistema se sigue enfriando la anortita continúa a cristalizar, mientras que la composición del fundido se desplaza progresivamente a lo largo del liquidus hacia el punto f (la continua cristalización de anortita empobrece el líquido en el componente An, enriqueciéndolo en Di; figura 9). El cambio de composición de la fase líquida ocurre a través de la reacción $\text{fundido}_1 = \text{anortita} + \text{fundido}_2$.

También en este caso se puede aplicar la regla de la palanca para determinar las proporciones relativas de anortita y líquido que coexisten a las diferentes temperaturas, usando la composición global del sistema como punto de apoyo. Lógicamente, la proporción entre sólido y líquido aumenta de manera continua conforme procede la cristalización.

Cuando el sistema alcanza la temperatura de 1274 °C, denominada temperatura eutéctica, el diópsido (g) empieza a cristalizar junto con la anortita (h), por lo que la fase líquida (f), que en estas condiciones presenta la composición eutéctica An_{41} , coexiste en equilibrio con dos fases sólidas (figura 9). En el punto eutéctico el sistema es invariante ($F = C - \phi + r = 2 - 3 + 1 = 0$): de hecho, solo existe una temperatura (1274 °C) en correspondencia de la cual las tres fases del sistema pueden coexistir en equilibrio; y en correspondencia de dicha temperatura la composición de las tres fases también es fija (puntos f, g y h). Estas consideraciones implican que la reacción $\text{fundido} = \text{diópsido} + \text{anortita}$ ocurre a una temperatura constante (la temperatura eutéctica) hasta que el fundido es consumido por completo. Asimismo, la composición del fundido permanece constante hasta que se termina la cristalización, ya que los dos minerales están cristalizando en proporciones análogas a las que definen la composición del fundido eutéctico (41% de anortita y 59% de diópsido; figura 9).

Una vez completada la cristalización, la desaparición de la fase fundida determina un aumento de F de 0 a 1 ($F = C - \phi + r = 2 - 2 + 1 = 1$), por lo que la temperatura del sistema, ahora conformado por una asociación de diópsido y anortita en proporciones análogas a las que conformaban el fundido inicial (70% An y 30% Di), puede seguir disminuyendo (figura 9).

Los sistemas cuya composición se grafica a la izquierda de la composición eutéctica presentan un comportamiento de cristalización similar al del sistema analizado; sin embargo, en este caso el primer mineral que cristaliza es el diópsido, mientras que la

anortita empieza a cristalizar junto con el diópsido cuando la fase líquida coexistente alcanza la composición eutéctica. Esto implica que, independientemente de la composición de la mezcla fundida de Di y An, la última fracción de fundido en cristalizar tendrá una composición eutéctica, y la cristalización se completará en correspondencia de la temperatura eutéctica.

6. Sistemas magmáticos de tres componentes (ternarios)

Los sistemas magmáticos ternarios se representan en diagramas de fases isobáricos T-X-X (tridimensionales) en los cuales la base tiene forma de un triángulo equilátero, mientras que el eje de la temperatura es perpendicular al plano del triángulo. Para graficar la composición de estos sistemas se puede seguir usando un diagrama bidimensional (la base triangular) debido a que, como la suma de los porcentajes de cada componente debe dar 100% ($C_1 + C_2 + C_3 = 100\%$), es suficiente especificar la concentración de dos componentes (por ejemplo, C_1 y C_2) para obtener automáticamente la del tercero ($C_3 = 100\% - C_1 - C_2$).

6.1. Sistemas ternarios con eutéctico: el sistema diópsido-anortita-forsterita

Los sistemas ternarios más simples son los que están conformados por componentes inmiscibles en el estado sólido. El sistema que analizaremos como ejemplo se construye a partir del sistema binario Di-An descrito previamente, agregando la forsterita como tercer componente. Debido a que el olivino es un mineral muy común en los basaltos y gabros (figura 10), el sistema Di-An-Fo es un modelo basáltico/gabroico más completo y realista respecto al sistema binario Di-An. En los sistemas basálticos naturales, tanto Di como An y Fo suelen mezclarse con otros términos puros para formar soluciones sólidas (piroxenos, plagioclasas y olivinos). Sin embargo, el tratamiento de sistemas con un número tan alto de componentes trasciende los objetivos de este trabajo, por lo que no

se consideran dichas mezclas y solo nos enfocaremos al sistema de tres componentes puros.

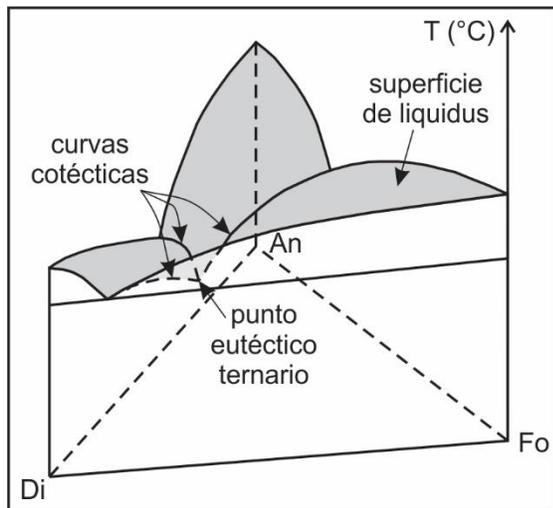


Figura 10. Roca ígnea gabroica compuesta de olivino (cristales anaranjados por efecto de una oxidación), piroxeno (cristales negros) y plagioclasa (cristales más claros). Imagen tomada de <https://www.sandatlas.org/gabbro/>.

La figura 11 ilustra el diagrama de fases T-X-X para el sistema $MgFeSi_2O_6$ - $CaAl_2Si_2O_8$ - Mg_2SiO_4 , determinado a la presión constante de 0.1 MPa (Winter, 2014). La variación composicional de este sistema se representa en un diagrama triangular en el cual cada componente puro ocupa un vértice. Al agregar la variable temperatura, el diagrama de fases adquiere la forma de un prisma triangular cuyas caras laterales son sistemas binarios con eutéctico (Di-An, An-Fo y Di-Fo). El liquidus, que en cada sistema binario está representado por una línea curva, se convierte ahora en una superficie compleja, conformada por tres “colinas” cuyas cumbres están definidas por las temperaturas de cristalización de Di, An y Fo. Las colinas están separadas por unos “valles térmicos”, denominados curvas cotécticas, los cuales convergen hacia el mínimo térmico de la superficie de liquidus, denominado punto eutéctico ternario.

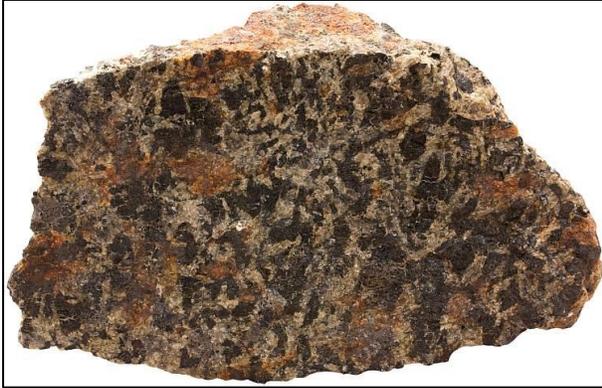


Figura 11. Diagrama de fases T-X-X para el sistema diópsido-anortita-forsterita, construido a presión atmosférica (0.1 MPa). Imagen modificada de Winter (2014).

Para simplificar su visualización, el diagrama Di-An-Fo se suele representar de manera bidimensional, como un “mapa” en el cual la superficie de liquidus está definida por curvas isothermas (figura 12) (Winter, 2014). Las curvas cotécticas dividen el diagrama en tres campos, en cada uno de los cuales la fase fundida coexiste con una fase mineral. Examinemos el comportamiento de un sistema de composición $\text{Di}_{36}\text{An}_{10}\text{Fo}_{54}$ (punto a de la figura 12) sometido a un enfriamiento. Cuando el sistema se encuentra a una temperatura superior a $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$, solo está presente una fase líquida (el fundido). En estas condiciones el sistema es trivariante ($F = C - \phi + r = 3 - 1 + 1 = 3$), por lo que hay que especificar la temperatura y dos variables composicionales (por ejemplo, el porcentaje de Di y An en el fundido) para definir de manera completa el sistema (al conocer que el fundido está compuesto por el 36% de Di y el 10% de An, la tercera variable composicional es automáticamente determinada: % de Fo = $100 - 36 - 10 = 54$).

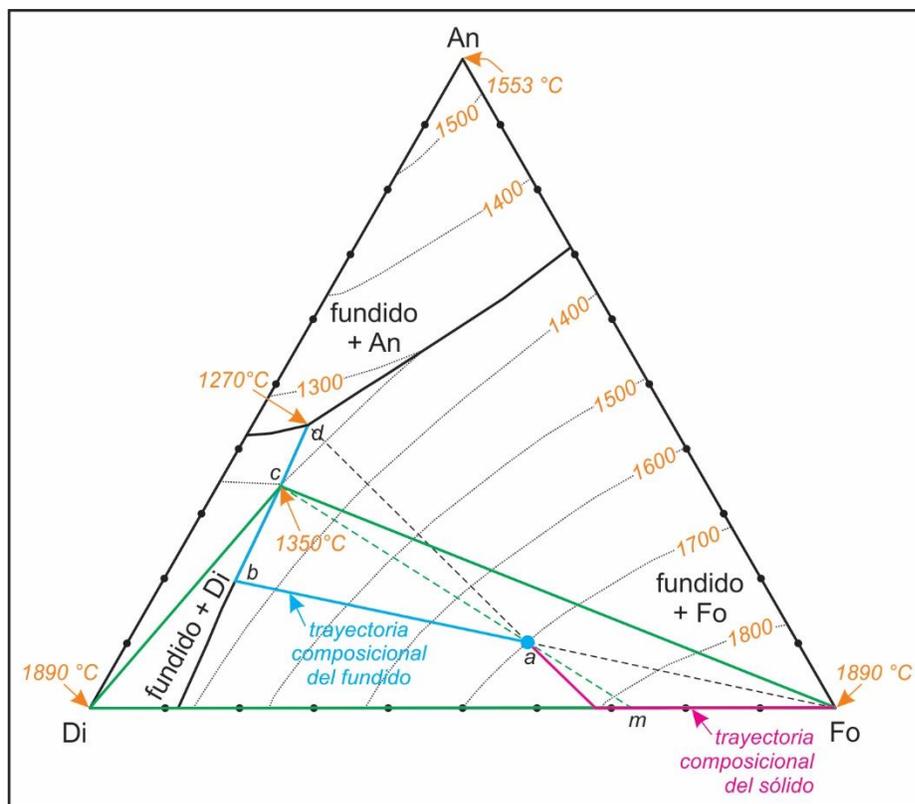


Figura 12. Representación bidimensional del diagrama Di-An-Fo construido a presión atmosférica ($P = 0.1$ MPa); las isoterma definen la forma de la superficie de liquidus. Imagen modificada de Winter (2014).

Cuando alcanza la temperatura de $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$, el sistema encuentra la superficie de liquidus en el campo “fundido + Fo” (figura 12), por lo que la forsterita comienza a cristalizar en equilibrio con el fundido. En estas condiciones el sistema es divariante ($F = C - \varphi + r = 3 - 2 + 1 = 2$), es decir, se tienen que especificar dos variables (por ejemplo, T y la composición del líquido) para definir el estado del sistema.

Durante el progresivo enfriamiento, la continua cristalización de forsterita empobrece el líquido en el componente Fo y lo enriquece en Di y An, por lo que la composición del fundido se desplaza del punto a al punto b a través de la reacción $\text{fundido}_1 = \text{forsterita} + \text{fundido}_2$. La representación gráfica de la variación composicional del fundido del punto a al punto b se obtiene trazando una recta desde el vértice Fo del diagrama hasta el punto a, y prolongándola hacia la curva cotéctica que separa los campos “fundido + Fo” y “fundido + Di” (figura 12). Con los puntos que representan la composición del líquido y del sólido que coexisten a cierta temperatura, y usando el punto a como fulcro, se podría aplicar la regla de la palanca para determinar las proporciones de las dos fases a la temperatura considerada.

Cuando el sistema alcanza la temperatura de ~ 1350 °C (figura 12) el diópsido empieza a cristalizar junto con la forsterita, por lo que el líquido de composición b coexiste con dos fases sólidas. En estas condiciones el sistema es univariante ($F = C - \phi + r = 3 - 3 + 1 = 1$), por lo que es suficiente especificar una variable para definir su estado de manera completa. Por ejemplo, al definir la temperatura (~ 1350 °C), la composición del líquido que coexiste con Di y Fo a esa temperatura se obtiene a partir del punto en la curva cotéctica correspondiente a la temperatura considerada (punto b: $\text{Di}_{71}\text{An}_{20}\text{Fo}_9$).

Conforme el sistema se sigue enfriando, la continua cristalización de Di y Fo a través de la reacción $\text{fundido}_1 \rightarrow \text{fundido}_2 + \text{diópsido} + \text{forsterita}$ enriquece el fundido en el componente An. Dado que la curva cotéctica es un “valle térmico”, la composición del fundido migra necesariamente a lo largo de dicha curva hacia el mínimo térmico (cambios composicionales en cualquier otra dirección implicarían un aumento de temperatura).

También en este caso es posible determinar las cantidades relativas de Di, Fo y líquido que coexisten en equilibrio a cierta temperatura. Consideremos por ejemplo las fases c, Di y Fo que coexisten a la temperatura de 1300 °C, y construyamos un triángulo que tenga en sus vértices la composición de dichas fases (figuras 12 y 13). Según la regla de la palanca, las cantidades relativas de las tres fases deberían equilibrarse en un fulcro, representado por la composición global del sistema (punto a). Para determinar el porcentaje relativo de líquido y sólido coexistentes, se debe trazar una recta que conecte el punto c con el lado opuesto del triángulo, pasando por el fulcro (figuras 12 y 13). Dicha recta encuentra el lado Di-Fo en el punto m, el cual representa la masa cristalina total (diópsido + forsterita) que coexiste con el líquido c a la temperatura considerada. Aplicando la regla de la palanca [% fundido = $100 * l / (l + s)$; % cristales = $100 - \% \text{ fundido}$] se obtiene que, a una temperatura de 1300 °C, el sistema está conformado por el $\sim 27\%$ de fundido y el $\sim 73\%$ de cristales de Di y Fo. De la misma manera, aplicando la regla de la palanca al lado Di-Fo del triángulo y usando el punto m como fulcro, se pueden calcular las proporciones de Di y Fo que conforman la masa cristalina total a la temperatura considerada: % diópsido = $100 * y / (x + y) = 27\%$; % forsterita = $100 - \% \text{ diópsido} = 73\%$ (figuras 12 y 13).

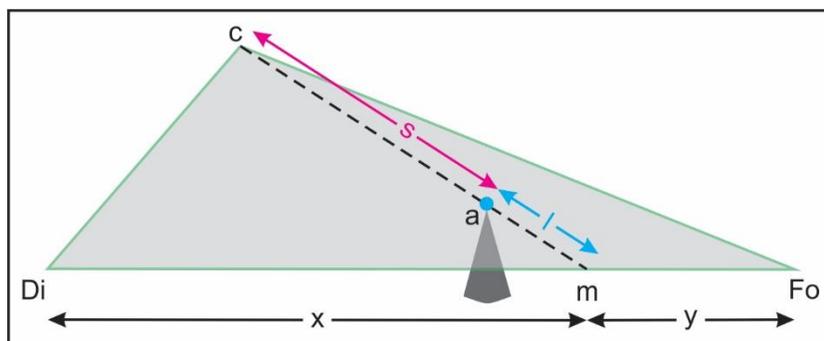


Figura 13. El diagrama ilustra cómo se obtienen las proporciones relativas de tres fases de un sistema de composición global a, las cuales coexisten en equilibrio a cierta temperatura. Imagen modificada de Winter (2014).

Cuando el sistema alcanza la temperatura de 1270 °C (figura 12) la anortita comienza a cristalizar junto con la forsterita y el diópsido. En esta condición, los tres sólidos coexisten en equilibrio con un fundido magmático de composición d (composición eutéctica: $Di_{50}An_{43}Fo_{7}$). En el punto eutéctico el sistema es invariante ($F = C - \phi + r = 3 - 4 + 1 = 0$): de hecho, solo existe una temperatura en correspondencia de la cual las cuatro fases del sistema pueden coexistir en equilibrio, y en correspondencia de dicha temperatura la composición de las cuatro fases también es fija (Di, An, Fo y d). El sistema permanece a la temperatura eutéctica hasta que la reacción fundido = diópsido + anortita + forsterita lleva a la completa desaparición de la fase líquida.

Una vez completada la cristalización, la desaparición de la fase fundida determina un aumento de F de 0 a 1 ($F = C - \phi + r = 3 - 3 + 1 = 1$), por lo que la temperatura del sistema, ahora conformado por una asociación de forsterita, diópsido y anortita en proporciones análogas a las que conformaban el fundido inicial (36% Di, 10% An y 54% Fo), puede seguir disminuyendo. Debido a que la presión es constante y la composición de las tres fases es fija, solo hay que especificar la temperatura para definir de manera completa el estado del sistema.

Los sistemas cuya composición se grafica en los otros campos del diagrama presentan un comportamiento de cristalización similar al del sistema analizado. De hecho, aunque la composición del fundido ternario afecta el orden de cristalización de las diferentes fases minerales, la última fracción de fundido en cristalizar tendrá siempre una composición eutéctica, y la cristalización se completará en correspondencia de la temperatura eutéctica.

7. Conclusiones

Los experimentos de equilibrio de fases en sistemas ígneos simplificados, y el análisis de los diagramas de fases derivados de dichos experimentos, arrojan luz sobre los mecanismos responsables del comportamiento de cristalización observado en los fundidos magmáticos naturales (véase la sección 2 de este trabajo), y permiten extraer algunas conclusiones generales sobre el proceso de cristalización magmática, que se reportan enseguida.

- A diferencia de los sistemas de un componente, que en condiciones de presión definidas cristalizan a una temperatura específica, los sistemas de dos o más componentes (y por ende todos los magmas, que por su naturaleza son multicomponentes) cristalizan en un rango de temperaturas (véase la observación 1 en la sección 2). Los sistemas binarios con solución sólida, como la plagioclasa (Ab-An) o el olivino (Fa-Fo), terminan de cristalizar a una temperatura que depende de la composición inicial del magma, y cuyo valor está comprendido entre las temperaturas de cristalización de los componentes puros (figuras 4 y 7). Por otra parte, cualquier fundido basáltico conformado por componentes inmiscibles, como Di-An o Di-An-Fo, termina de cristalizar a la temperatura eutéctica, que es más baja respecto a la temperatura de cristalización de los componentes puros (figuras 9 y 12).
- El proceso de cristalización induce continuos cambios composicionales en la fase fundida (sección 2, observación 2). En sistemas binarios con solución sólida, el líquido magmático se enriquece progresivamente en el componente menos refractario, y la composición de la última fracción de líquido varía en función de la composición inicial del sistema (figuras 4 y 7). En cambio, en sistemas eutécticos, el líquido evoluciona siempre hacia la composición eutéctica, independientemente de la composición inicial del magma (figuras 9 y 12).
- Los sistemas eutécticos analizados permiten entender el proceso de cristalización secuencial de distintos minerales durante el enfriamiento magmático, y muestran cómo el orden de cristalización esté dictado por la composición inicial del sistema (sección 2, observaciones 3, 4 y 6). Por ejemplo, si la composición de un fundido basáltico se encuentra en correspondencia del campo “fundido + An” en el diagrama

de fases Di-An-Fo (figura 12), a partir de dicho fundido cristalizará primero la anortita, posteriormente una asociación de anortita y forsterita, y finalmente un agregado de anortita, forsterita y diópsido en proporciones análogas a las del sistema inicial.

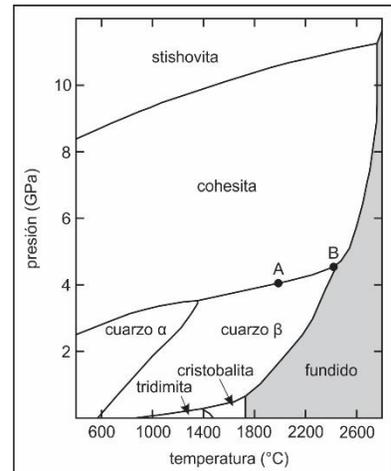
- La mayoría de los minerales ígneos son soluciones sólidas que sufren continuos cambios composicionales durante la cristalización (sección 2, observación 5). Los diagramas de fases de la plagioclasa y del olivino muestran que el primer cristal que se forma a partir de un fundido de dos componentes miscibles está más enriquecido en el componente refractario respecto al fundido inicial, y que, durante el enfriamiento, la fase sólida se enriquece progresivamente en el componente menos refractario, hasta alcanzar la composición inicial del sistema al terminar la cristalización.

8. Referencias

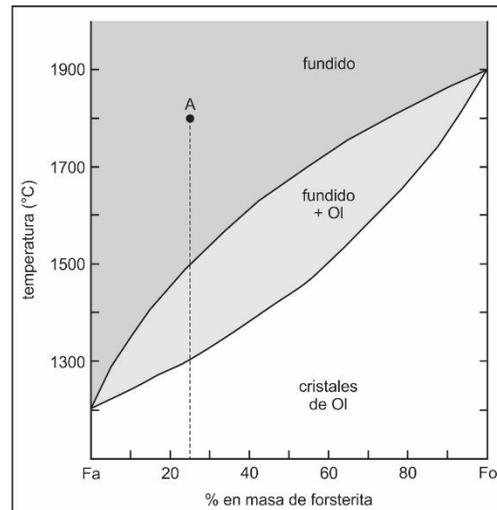
- Best, M. G., 2003. *Igneous and Metamorphic Petrology (Second Edition)*. Blackwell Science Ltd.
- Frost, B. R. y Frost, C. D., 2014. *Essentials of Igneous and Metamorphic Petrology*. Cambridge University Press.
- Gill, R., 2010. *Igneous Rocks and Processes. A Practical Guide*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Gill, R., 2015. *Chemical Fundamentals of Geology and Environmental Geoscience (Third Edition)*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Sen, G., 2014. *Petrology. Principles and Practice*. Springer.
- Winter, J. D., 2014. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology (Second Edition)*. Pearson Education Limited.
- Wright, T. L. y Okamura, R. T., 1977. *Cooling and Crystallization of Tholeiitic Basalt, 1965 Makaopuhi Lava Lake, Hawaii*. United States Geological Survey Professional Paper 1004.

9. Autoevaluación

1. Considera el diagrama de fases P-T de la sílice.
 - a) Utilizando la regla de las fases de Gibbs, calcula la variancia de un sistema ubicado en el punto A.
 - b) ¿Qué significa que el sistema ubicado en el punto B es invariante?

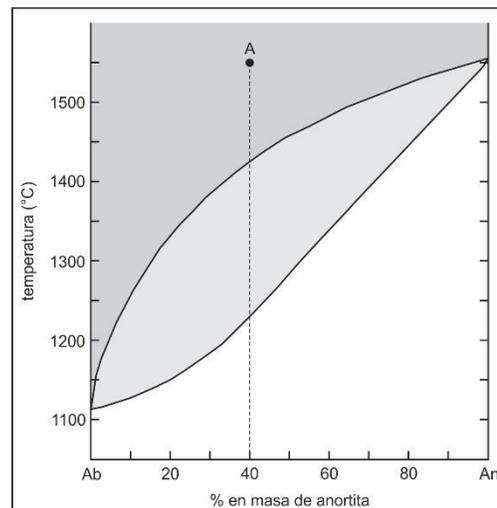


2. En el diagrama de fases isobárico albita-anortita se representa un sistema A de composición An_{40} sometido a un progresivo enfriamiento. ¿Cuáles fases estarán presentes en el sistema a las temperaturas de 1500, 1300, 1200 y 1100 °C?



3. En el diagrama de fases isobárico fayalita-forsterita se representa un fundido A de composición Fo_{25} sometido a un enfriamiento.

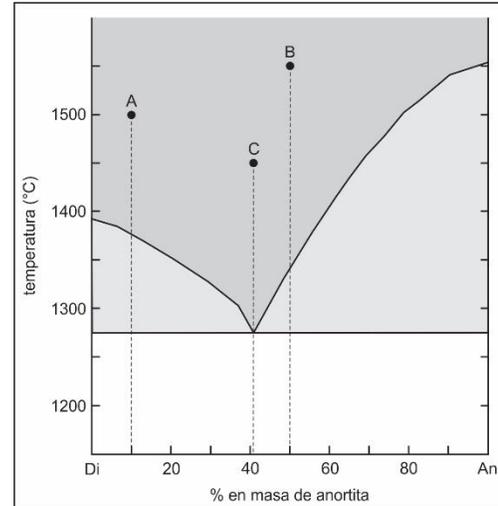
- a) ¿En qué rango de temperaturas se llevará a cabo el proceso de cristalización de A?
- b) Traza la trayectoria evolutiva que sigue el líquido magmático durante el progresivo enfriamiento del sistema.
- c) ¿Qué composición tendrá el primer olivino derivado de la cristalización del fundido A?



d) ¿A qué temperatura la fase fundida y la sólida coexistirán en proporciones análogas?

e) ¿Qué composición tendrá el olivino derivado de la completa cristalización de A?

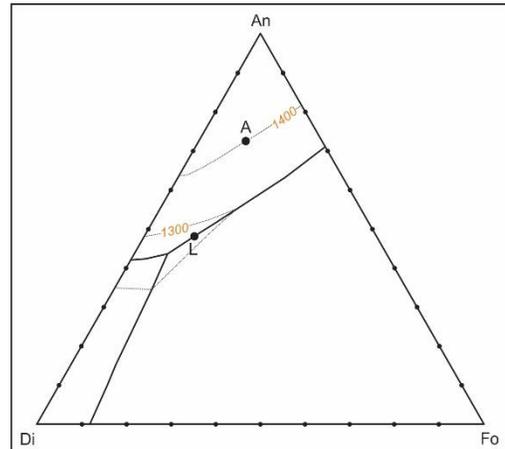
4. En el diagrama de fases isobárico diópsido-anortita se representa un sistema A de composición An₁₀ sometido a un progresivo enfriamiento. ¿Cuáles fases estarán presentes en el sistema a las temperaturas de 1400, 1350 y 1200 °C, y qué composición tendrán?



5. En el diagrama diópsido-anortita, considera ahora el proceso de enfriamiento de un fundido B de composición An₅₀.
- a) ¿Cuál es el primer mineral que cristalizará a partir del fundido B?
 - b) Por medio de la regla de la palanca, determina el porcentaje relativo de líquido magmático y cristales que coexistirán a la temperatura de 1300 °C e indica la composición de cada fase.
 - c) Traza la trayectoria evolutiva del sólido durante el progresivo enfriamiento de B.
6. En el diagrama de fases diópsido-anortita, considera ahora el proceso de enfriamiento de un fundido C de composición eutéctica, e indica cuáles de las siguientes afirmaciones son correctas.
- a) El fundido C cristaliza en un intervalo de temperatura comprendido entre la temperatura eutéctica y 1150 °C.
 - b) La cristalización de C se lleva a cabo a una temperatura constante, correspondiente a la temperatura eutéctica.
 - c) El primer mineral que cristaliza a partir de C es la anortita, ya que es más refractaria.
 - d) El primer mineral que cristaliza a partir de C es el diópsido, ya que es más abundante en el sistema.

e) Cuando el líquido C alcanza la temperatura eutéctica, se encuentra en equilibrio con dos fases sólidas.

7. En el diagrama de fases isobárico diópsido-anortita-forsterita, considera el proceso de cristalización de un fundido A sometido a un enfriamiento.



a) Traza la trayectoria evolutiva del líquido magmático durante el enfriamiento.

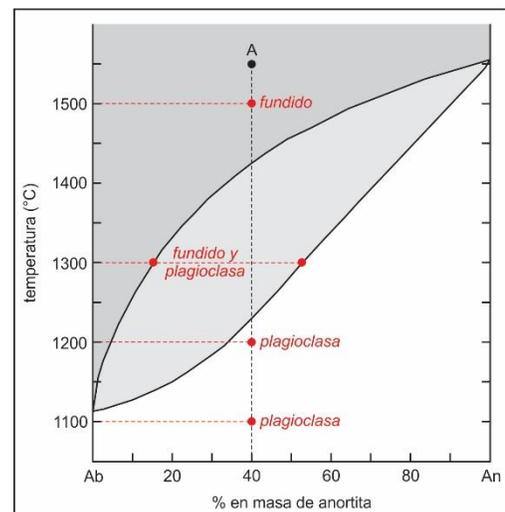
b) Indica en qué orden cristalizan los diferentes minerales, y especifica a qué temperatura aparece cada uno.

c) Ubica en el diagrama el sólido S que coexiste en equilibrio con el líquido L, y determina la proporción relativa de cada uno, aplicando la regla de la palanca; adicionalmente, calcula las proporciones de anortita y forsterita en el sólido S.

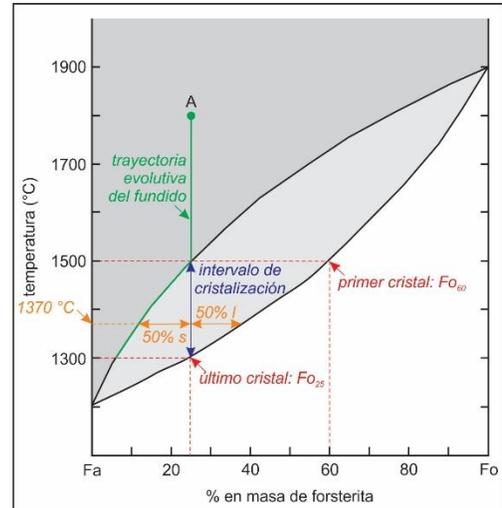
10. Autoevaluación (soluciones)

1. a) $F = C - \phi + r = 1 (\text{SiO}_2) - 2 (\text{cohesita y cuarzo } \beta) + 2 (\text{P y T}) = 1$. b) Significa que para definir su estado no es necesario especificar ningún parámetro ambiental, pues la coexistencia en equilibrio de fundido, cohesita y cuarzo β sólo se da en las condiciones de presión y temperatura correspondientes al punto B.

2. Las fases que estarán presentes en el sistema a las temperaturas consideradas son: fundido (1500 °C); fundido y plagioclasa (1300 °C); plagioclasa (1200 y 1100 °C).

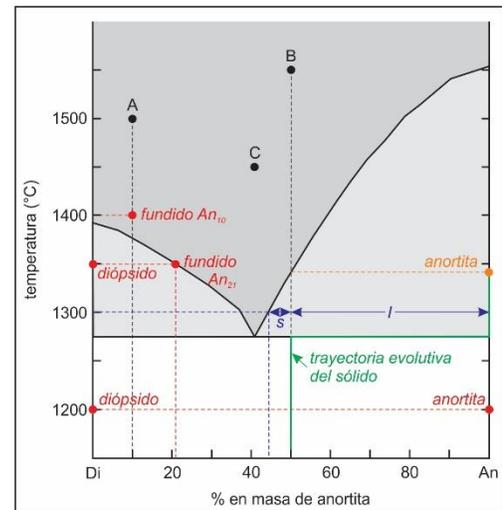


3. a) La cristalización del fundido A se llevará a cabo entre 1500 y 1300 °C. b) La trayectoria evolutiva del líquido magmático se indica en la figura. c) El primer olivino derivado de la cristalización de A tendrá composición Fo₆₀. d) El líquido magmático y la fase sólida coexistirán en las mismas proporciones a una temperatura de 1370 °C. e) El olivino derivado de la completa cristalización de A tendrá composición Fo₂₅.

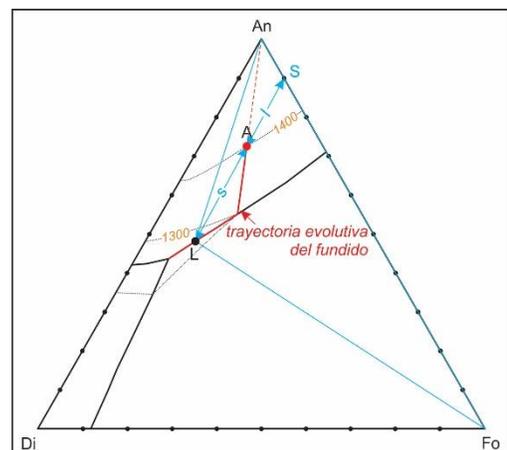


4. Las fases que estarán presentes en el sistema A a las temperaturas consideradas son: fundido de composición An₁₀ (1400 °C); fundido de composición An₂₁ y diópsido (1350 °C); diópsido y anortita (1200 °C).

5. a) El primer mineral que cristalizará a partir del fundido B será la anortita. b) Por la regla de la palanca, % fundido = $100 \cdot l / (l + s)$ y % cristales = $100 - \% \text{ fundido}$. Considerando que $s = 50 - 44 = 6$ y $l = 100 - 50 = 50$, se obtiene que, a 1300 °C, el sistema está conformado por el ~89% de un fundido de composición An₄₄ y el ~11% de cristales de anortita. c) La trayectoria evolutiva del sólido durante el enfriamiento se indica en la figura.



6. Las afirmaciones correctas son la b) y la e).
7. a) La trayectoria evolutiva del líquido magmático se indica en la figura. b) Durante el progresivo enfriamiento de A se formará primero la anortita, que empezará a cristalizar a 1400 °C; a 1300 °C la forsterita empezará a cristalizar en asociación con la anortita; mientras que, a la temperatura



eutéctica, el diópsido empezará a cristalizar con los otros dos minerales. c) Se construye un triángulo cuyos vértices están representados por las tres fases coexistentes (líquido L, An y Fo), y se traza la recta L-S que conecta el punto L con el lado opuesto del triángulo, pasando por A. El punto S en el lado An-Fo representa la masa cristalina total (anortita + forsterita) que coexiste en equilibrio con el líquido L. Aplicando la regla de la palanca [% fundido = $100 * l / (l + s)$; % cristales = $100 - \% \text{ fundido}$] se obtiene que, a la temperatura considerada, el sistema está conformado por el ~42% de fundido y el ~58% de cristales de An y Fo. De la misma manera, aplicando la regla de la palanca al lado An-Fo y usando el punto S como fulcro, se pueden calcular las proporciones relativas de An y Fo en el sólido S: % anortita = $100 * S-Fo / (An-S + S-Fo) = 90\%$; % forsterita = $100 - \% \text{ anortita} = 10\%$.