

Barus e Iddings en una nota publicada el mismo año, afirman que el ácido silícico es el disolvente y que el magma es una solución y no una aleación; en efecto, en las aleaciones metálicas aumenta la resistencia eléctrica con la temperatura, mientras aumenta, dentro de ciertos límites, la conductibilidad con la temperatura en las soluciones salinas. Las experiencias demuestran que en la fusión de una roca eruptiva disminuye la resistencia eléctrica con la temperatura, además la conductibilidad aumenta con la proporción de la sílice. La analogía con una solución acuosa es absoluta y en este caso el ácido silícico obra como disolvente.

Johnston-Lavis ha combatido la hipótesis de la diferenciación de un magma único y ha dado a conocer otra que tiende a explicar el origen de las facies periféricas básicas, por aporte al magma desde las rocas envolventes de combinaciones básicas ($Mg\ F_2\text{-}Ca$). "Los magmas esecxíticos de Grauwitz, nacieron en el contacto de un magma ácido con rocas sedimentarias básicas; entonces tendrían lugar cambios físico-químicos que determinarían la formación de nuevos minerales a expensas de los silicatos, alumina, alcalís y otros elementos". Esta teoría llamada osmótica apenas si puede defenderse, pues son muchísimos los hechos que la contradicen y muy pocos los que pueden explicarse por ella.

Birkeland supone que la fuerza eléctrica pudo haber orientado la diferenciación. "Por la ascensión del magma, ya en grietas, ya como masas intrusivas, se producen corrientes eléctricas de origen termo-eléctrico u otro; la corriente principal debió marchar por las mismas grietas de inyección, puesto que el magma conduce mucho mejor la electricidad que las rocas. Cuando las corrientes alcanzan a un magma encerrado en una grieta o formando un lacolito, deben éstas repartirse independientemente de la forma de la grieta o lacolito; el valor de la corriente normal a la superficie limitante es igual en todas direcciones, y las superficies equipotenciales son concéntricas entre sí, y a la superficie que limita el dique o el batolito". Estas corrientes habrán creado superficies de diferenciación en el magma; en efecto por electrolisis del vidrio se ha obtenido una diferenciación, pues en el ánodo se separa una capa de sílice. Por la electrolisis de las soluciones salinas acuosas sabemos, que las diversas sales marchan con velocidad distinta, si esto ocurre también en la solución *magma* es muy verosímil la diferenciación por esta causa.

G. F. Becker (1) considera el magma como una mezcla de dos o más líquidos de diferente punto de fusión; por enfriamiento de la masa, se formarán primero, en la roca periférica, cristales de las sustancias más pesadas; por corrientes de convección llega a esta parte nueva cantidad de esas sustancias, pudiendo llegarse por progresivo enfriamiento o por disminución de la presión a una mezcla eutéctica (2) en el centro de la masa o sea en la parte más caliente; este término

(1) Fractional Crystallization of Rocks. Am. Journ. Science. 1897.

(2) Una mezcla que por enfriamiento deposita cristales de la misma composición.

extremo es la combinación entre todos los posibles con los elementos del magma, que posee el punto de fusión más bajo.

Es notable la idea de Becker, porque sus estudios sobre los magmas eutecticos han servido después a muchos autores para explicar los fenómenos de la diferenciación magmática.

Se manifiesta contrario a la diferenciación por el principio de Soret, porque entiende que esta no puede producirse más que a distancia microscópica y había de necesitar tiempo extraordinariamente largo y mucho más por ser los magmas soluciones muy viscosas.

A. Michel-Levy en varias publicaciones (1893-1897-1907) ha tratado del origen, naturaleza y diferenciación de los magmas. Es contrario a la diferenciación según el principio de Soret porque en la masa eruptiva de Porfido azul del Esterel, no ha podido encontrar diferencia química apreciable entre las regiones central y periférica. Admite la existencia de dos magmas fundamentales ("los únicos susceptibles de definición precisa y dotados de individualidad viviente") el *ferromagnésico* y el *alcalino*. Ni el uno ni el otro son mezclas o soluciones de elementos en proporciones constantes, sino que éstas varían mucho, particularmente en el alcalino. El estudio de los macizos eruptivos, parece probar una real independencia de estos dos magmas, que no se comportan del mismo modo ante la evolución de la serie eruptiva; el alcalino permanece estable y el ferromagnésico es reemplazado en todo o en parte. Las rocas representantes del ferromagnésico se obtienen artificialmente por fusión ígnea (diabasas, basaltos, etc.); los del otro magma (granitos porfidos, traquitas, etc.) no han podido obtenerse en el laboratorio por fusión ígnea "la intervención en ellos de la fumarola es evidente".

"El contraste entre estos dos magmas es grande; el ferromagnésico parece desempeñar el papel de escoria ígnea, mientras el alcalino es esencialmente movable y susceptible de sutiles inyecciones entre las capas de la corteza terrestre; parece éste destinado a ser arrastrado por los disolventes y los mineralizadores..."

En su nota sobre la clasificación de los magmas de las rocas eruptivas (Bol. Soc. Geol. Francia-25-1897), después de dedicar mucho espacio a definir químicamente los tipos de magmas posibles y al modo de representar gráficamente su composición química, estudia las condiciones de diferenciación de los magmas. Este estudio es de gran interés y por representar la opinión en él sustentada, las ideas de la escuela francesa, haré un resumen algo detallado de la hipótesis de Michel-Levy.

Cree que los primeros magmas nacen de la mezcla de estos dos magmas fundamentales, verificada en regiones profundas de las costras, pero los magmas así elaborados precisan, antes de transformarse en rocas, experimentar diferenciaciones que expliquen, no sólo la existencia de las series de rocas de una misma familia, sino también el parentesco, a grandes distancias, de ciertas series y la profunda diferencia, a veces observada, entre series de dos regiones muy próximas.

“Además de tener en cuenta la naturaleza y diferente papel de cada uno de los magmas fundamentales, en toda teoría de diferenciación, deben tenerse en cuenta aquellas variaciones de composición del magma motivadas por la absorción o asimilación de ciertas masas de rocas que envuelven al magma (fenómenos de endomorfismo) y por la pérdida de gases y líquidos mineralizadores, que empapando los sedimentos envolventes, los transforman en rocas metamórficas. Estos hechos, de universal repartición, no pueden explicarse por el principio de Soret. Es preciso admitir la circulación de ciertos gases y vapores mineralizadores capaces de arrastrar consigo determinados elementos”. En ella ve Michel Levy el principal factor de la diferenciación.

Las masas de magma tienen varios orígenes: 1.º el magma ferromagnésico que sirve de escoria al botón de hierro impuro que suponemos forma la región central del Globo; 2.º Los productos de este botón fácilmente arrastrables por los mineralizadores (alcalís, alúmina y sílice); 3.º el resultado de la fusión de las bóvedas sedimentarias, producida por la elevación de las isogeotermas, ya sea debida al aumento de espesor de la formación sedimentaria, ya a la ascensión de grandes masas de magma ígneo. En estas masas magmáticas, continúan circulando las mineralizadoras y como es natural, habrá lugares de más fácil circulación, como son las fracturas, hiendas, planos de estratificación, disyunción y en una palabra a lo largo de las líneas de menor presión; es estos puntos se acumulará el exceso de alcalís, alúmina y sílice y se formarán magmas alcalinos cada vez más puros y alejados del ferromagnésico. Si la diferenciación por circulación de mineralizadores se persigue mucho tiempo en un magma, tendremos como último resultado dos magmas extremos, uno básico que se aproxima al ferromagnésico y otro ácido análogo al alcalino, pero en posición inversa a la deducida del principio de Soret; en el fondo quedará el magma más básico y en la región periférica el más ácido. Según esto los productos ácidos son los primeros y los básicos los últimos que hacen erupción.

La hipótesis de la asimilación de las rocas envolventes por el magma, ha sido aplicada además de para explicar la composición mineralógica y química de las facies periféricas de los macizos graníticos, para explicar también el modo de erupción (*mice en place*) del granito; pero no puede atribuirse a Michel Levy la gloria de fundador de tal hipótesis, que ya Th. Kjerul en 1879 dijo que la erupción del granito de Noruega se reducía a una intrusión de la masa fluída interior en la Costra, con asimilación de las rocas que se oponían a su paso. Al describir Michel-Levy su hipótesis sobre la asimilación y la *mice en place* del granito, no cita la obra de Kjerulf, lo que hace pensar que le era desconocida.

F. Læwinson-Lessing (1), reconoce como principal causa de la diferenciación, la fusión y asimilación de grandes masas de rocas próximas al magma; después

(1) Etudes de petrographie generales... Trav. Soc. Nat. Petersbourg. 26-1898 y Studien über die Eruotivgesteine. Compt. rend. VII, sess: congr: geol: intern: Petersbourg, 1899.

de hacer un estudio crítico de las opiniones hasta entonces sustentadas, concluye que la diferenciación necesita no sólo procesos de difusión sino también de asimilación. Aplica la ley de las fases a los silicatos fundidos, estudia la influencia del agua bajo el punto de vista de esta ley y deduce que si se supone el agua no combinada su influjo en el proceso de diferenciación será nulo pues la separación de esta fase única e independiente no destruye el equilibrio del sistema; la influencia del agua es puramente mecánica, disminuir la viscosidad del magma.

J. H. L. Vogt (1), ha tratado de explicar por fenómenos de diferenciación magmática, la formación de filones metalíferos, óxidos y sulfidos, y ha llegado a conclusiones importantes si bien a nosotros no nos interesan por ahora. Al final de su trabajo hace algunas consideraciones teóricas sobre la diferenciación de los magmas, que por su indiscutible valor expondré, siquiera sea muy a la ligera. La formación de minerales en una fusión silicatada es esencialmente condicionada por la ley de la acción de la masa o del equilibrio químico, e influida por la presión, temperatura y agua existente. El estudio de rocas productos de diferenciación muy avanzada enseña que la naturaleza de los productos de concentración en los diversos estados, varía a menudo en alto grado de tal modo que la composición de los magmas parciales en cada instante, depende del grado más o menos avanzado de diferenciación. La diferenciación es una función de la composición del magma inicial, lo que se explica sencillamente por la ley de la acción de la masa. Deben también tenerse en cuenta las leyes de los electrolitos, pues el magma conduce bien la electricidad, y finalmente, intervienen como factores de la diferenciación, la composición química, la presión, temperatura, agua y otros agentes mineralizadores; viscosidad, fusibilidad, difusión, solubilidad, fenómenos magnéticos y eléctricos, y aún puede asegurarse que quedan factores que hasta aquí no han sido considerados.

C. Doelter (2) dió a conocer en 1901 una serie de investigaciones por demás interesantes. Determinó el punto de fusión de un gran número de minerales y rocas y llegó a fijar para cada especie mineral tres temperaturas características: 1.º el punto de fusión; 2.º el punto blando (cuando comienza a hacerse pastoso) y 3.º el punto de solidificación. Para las rocas no existe nunca un punto fijo de fusión, se comportan como mezclas en las cuales las sustancias que primero se funden disuelven gran cantidad de las otras. "La solubilidad de los minerales en el magma depende: 1.º de la presión; 2.º de la composición química del magma; 3.º de su temperatura; 4.º de la fusibilidad del mineral y 5.º de su dureza". No puedo comprender qué relación puede tener la dureza de un mineral con su solu-

(1) Beiträge zur Kenntnis der Mineralbildung in Schmelzmassen... Christiania 1812 y Weitere Untersuchungen über die Ausscheidungen von Tetaneisenerzen in basischen Eruptivgesteine. Zeitsch. f. prat. Geol. 1900.

(2) Über die Bestimmung des Schmelzpunktes, bei Mineralien und Gesteinen. Min. U. petr. Mitth. 1901—Die Schmelzbarkeit der Mineralien und ihre Löslichkeit im magma. Min. u. petr. Mitth. 1901 y Über einige petrogenetische Fragen Central H. f. Min. etc. 1902.

bilidad y fusibilidad en el magma y creo que algún defecto de técnica o error de apreciación llevó a Dolter a tales conclusiones.

Ha hecho también experiencias sobre la variación del peso específico de los minerales al fundirse, y llega a concluir que todo silicato fundido es más ligero que cuando está sólido y frío, por consiguiente los magmas al solidificarse experimentan una contracción.

Por fin en una nota sobre la composición química y génesis de las rocas de Monzoni (1912) trata de la diferenciación de los magmas, pero en ella se limita a reproducir las opiniones de Bröger, Vogt, Idding, y Michel-Levy, y lo mismo hace en sus célebres cuestiones petrogenéticas.

En 1903 ha publicado M. Schweig (1) una serie de experiencias para explicar la diferenciación. Cree como casi todos los petrógrafos modernos, que el estudio de las rocas puede ayudar a conocer algunos puntos del proceso de diferenciación, pero que la solución del problema únicamente puede esperarse de los experimentos. Para decidirse por una u otra teoría, se debe determinar las condiciones de solubilidad de los óxidos petrográficos en los silicatos y a ello dedica su Memoria. Después indica que los principales factores de la diferenciación son, según sus observaciones, la temperatura y la presión. La influencia de ésta es análoga a la de la disminución de la temperatura, puesto que eleva el punto de fusión. La de la temperatura se debe a que con ella crece la posibilidad de un silicato para disolver o asimilarse otros silicatos y óxidos. Termina Schweig su Memoria con las siguientes líneas que resumen su opinión sobre estas cuestiones. "Me imagino la diferenciación como una sencilla cristalización producida por disminución de temperatura o por aumento de presión; si el magma no es viscoso o la solidificación se verifica rápidamente, se tendrá siempre una separación de los cristales, en el líquido madre, según su densidad; así que por este solo hecho ya se produce una diferenciación. Si la cristalización tiene lugar bajo alta presión, los cristales formados son inestables; es decir, que se disuelven o funden por disminución de la presión o por elevación de la temperatura y producen un magma diferente del magma madre. El proceso de diferenciación y el orden de cristalización no son tan sencillos como ordinariamente se indica, sino que se producen sobre saturaciones y por variación de la saturación cambiarán las condiciones y el orden de cristalización; aquéllas serán siempre determinadas por la ley de las fases de Gibbs, y un tema muy principal de la Petrogenia experimental será la aplicación de esta ley a los silicatos fundidos. Para esto pueden seguirse dos caminos: 1.º continuar los trabajos de Vogt sobre la cristalización y de Lagorio sobre la composición de los cristales y la pasta vítrea y 2.º el estudio de las mezclas eutécticas. Para este último se partirá de una mezcla de sílice y una base y después

(1) Untersuchungen über die differentiation der Magmen. N. Jahrb. f. Min. Geol. u. Palaeont. XVII.

se añadirá más óxido hasta llegar a un silicato de la misma composición que un magma (roca) natural”.

Este trabajo llevado a cabo por Schweig ha dado resultados sorprendentes y si bien hoy no se pueden deducir conclusiones de carácter general, por ser pocas las experiencias, debe esperarse que por este método se resolverán no pocos problemas de la génesis petrográfica.

F. Loewinson-Lessing (1) ha expuesto muy recientemente una teoría petrográfica que creo digna de mención. Demuestra primero que la composición media de la corteza terrestre, representa la composición de una mezcla del magma granítico y del gábrico en partes iguales. “Las rocas eruptivas se deben considerar como productos de diferenciación de dos magmas primitivos: el granítico (ácido) y el gábrico (básico)”. La diferenciación es doble: 1.º por cristalización, es decir, separación de los cristales ya formados según su peso específico; 2.º diferenciación en la substancia fluida que se manifiesta por la tendencia de toda fusión compleja a formar magmas monominerales o eutécticos. Así una fusión compuesta de dos minerales dará un magma de un mineral y otro eutéctico de dos minerales; una mezcla trimineral dará un magma de uno, otro de dos y otro de tres y por mezcla de estos magmas así separados, nacen rocas que llama híbridas, rocas anormales mezcla de otras varias. Admite que en la diferenciación entra como factor importante, aunque subordinado a las causas anteriores, la asimilación de rocas extrañas por el magma.

*

* *

De todas las teorías ideadas, para explicar la diferenciación de los magmas eruptivos, dos sólo cuentan hoy con numerosos partidarios: una la de la diferenciación por procesos físico-químicos tal como fué explicada por Rosebusch y Brögger y otra la de la formación de magmas especiales a expensas de dos primitivos, por la acción de agentes fluidos llamados mineralizadores y la asimilación de rocas inmediatas al magma. La primera está muy en boga entre todos los petrógrafos del mundo excepto los franceses que siguen la segunda, la de Michel-Levy. Los petrógrafos americanos parece se inclinan a la primera, pero admitiendo la de la asimilación para explicar algunos casos anormales.

Es indudable que en el proceso genético de las rocas eruptivas intervienen muchos y muy variados factores, pero los más importantes dependen de la naturaleza y condiciones físicas del magma, siendo los extraños a este de menor y en muchos casos de ningún valor, pues si en algunos casos hay motivos serios para admitir la asimilación de rocas preexistentes, en otros muchos no existe indicio alguno de tal fenómeno, como ocurre en todos los macizos de la Europa central y en la cadena costera catalana, donde el granito es de la misma composición en el

(1) The fundamental problems of Petrogenesis. etc. Geol. Mg. 8. 1911.

contacto de sedimentos ricos en cal y magnesia y hierro, que en las pobres en estos óxidos y ricos en sílice y alumina.

La diferenciación es un proceso físico-químico; las leyes porque se rige son las mismas que la Físico-Química ha descubierto en las aleaciones fundidas y soluciones ígneas o acuosas, aunque sea mayor la complejidad del fenómeno y más difícil la aplicación de estas leyes. No obstante ser grande esta dificultad se ha llegado en estos últimos años a aplicar a los magmas algunas de estas leyes y los resultados obtenidos son muy dignos de tener en cuenta.

H. Le Chatelier ha aplicado al magma granítico la ley de las fases, pero sus estudios y conclusiones son de más interés para el estado sólido de las rocas que para los magmas; explica la causa de que una roca tenga un número determinado de componentes esenciales, porque en todos los casos donde el estado final considerado (aquí la roca) es un estado de equilibrio, que ha sido alcanzado por una serie de transformaciones reversibles, el número de componentes (minerales en este caso) diferentes y justapuestos en la masa total será únicamente determinado por el de elementos que entran en su composición. Si n es el número de estos, p el de agentes físicos que varían y r el de compuestos independientes que se encuentran en presencia, $n + p - r$ expresa el número de variaciones independientes que puede experimentar el sistema. En el caso en que sólo varía uno de los agentes externos, la temperatura p. ej., como tiene lugar en las fusiones a presión ordinaria, $p = 1$ y la fórmula será $n + 1 - r$.

Según que esta expresión tenga por valor 0, 1, 2...—se dirá que el sistema es univariable, livariable, etc.; esto es, que sin alterar el estado de equilibrio pueden hacerse variar 0, 1, 2... de las condiciones que determinan su estado actual.

Aplicando esta ley a mezclas de cuerpos sólidos fundidos y solidificados por enfriamiento, se ha podido formular la siguiente ley: El estado estable de una mezcla sólida, corresponde a un sistema univariable; es decir, que el número de fases debe ser igual al número de elementos esenciales.

A pesar de reconocer la importancia que esta ley tiene en Físico-Química creo que será siempre escasa en Petrografía, porque la complejidad de los magmas hace muy difícil su aplicación y además no conocemos con seguridad ni las especies de moléculas existentes en el magma ni el número de fases.

Vant Hoff, ha aplicado el principio del equilibrio móvil. Le Chatelier, la ley del mínimo esfuerzo, Guldberg y Waage el de la acción química de la masa y Guthrie el principio del eutecticum. Además deben aplicarse a los magmas las leyes conocidas para las soluciones salinas, los electrolitos, pues está plenamente demostrado que el magma conduce la electricidad de modo análogo o como lo hacen las soluciones salinas acuosas.

Los factores principales de la formación y evolución de los magmas eruptivos, son sin duda alguna, la temperatura, presión y concentración, pero no pueden olvidarse todos aquellos fenómenos que han de producirse necesariamente en el interior del magma, determinados por el juego de afinidades químicas entre las

substancias en presencia, por la viscosidad de los magmas, valor y velocidad de cristalización de los componentes y por la actividad de los llamados mineralizadores.

Todos estos factores y algunos otros que aún no se han tenido en cuenta porque nos es desconocida su influencia en los magmas, y los fenómenos físicos y químicos que he indicado, determinan las diversas composiciones mineralógicas, estructuras y texturas de las rocas.

Para completar las ideas petrogénicas que he expuesto, sería preciso que entrase en otra fase del proceso formativo de las rocas, la que empieza con la separación de minerales al estado sólido y termina con la completa solidificación del magma. Pero sobre este proceso hay por lo menos tanto que hablar como para el de la diferenciación; y la indicación de las leyes porque se rige, así como la de los hechos perfectamente conocidos me llevaría a abusar extraordinariamente de vuestra atención y benevolencia; dejaré pues este segundo período de la historia de las rocas eruptivas para otra ocasión, en que me vea, como ahora, obligado a dirigiros la palabra.

*

* *

Todos los hechos observados—filones o diques compuestos, facies periféricas, la característica serie de términos complementarios, la consanguinidad entre rocas de la misma región y período eruptivo—se explican de modo satisfactorio por la teoría de la diferenciación. Cuanto más aumentan los conocimientos sobre provincias petrográficas bien definidas, más terreno va ganando esta teoría, sobre las de las mezclas, de la asimilación, de la licuación, la osmótica, etc. Podrá ser una u otra la causa de esta diferenciación, pero si no se hubiera producido, el magma primitivo seguiría siendo homogéneo y daría lugar a una sola especie de roca en cada macizo eruptivo y no a varias ligadas entre sí por ciertos caracteres químicos y mineralógicos que les prestan ese aire de familia (consanguinidad) tan característico de las diversas rocas de una misma provincia petrográfica.

Esta teoría hoy universalmente admitida está de acuerdo con la hipótesis geogénica Kant-Laplace; supone la existencia de un magma primitivo homogéneo, del cual por sucesivas modificaciones, se desarrollan varios magmas de distinta composición, los cuales sufrirán después nuevas segmentaciones que darán otra generación de magmas diferentes. En lo que no hay unanimidad de criterio es en la manera de representarse esta diferenciación. Para unos autores el primitivo magma se divide en dos magmas parciales separados y no miscibles; para otros la diferenciación se produce por aporte o sustracción (difusión) de substancia de una a otra parte del magma, es decir que la diferenciación no alcanza a la vez a todo el magma, sino que se reduce a una variación local de composición, cuyos límites no pueden fijarse claramente, sino que por pasos insensibles se llega a la

del magma madre. Otros autores ven en esto un proceso más sencillo; después de que el magma ha empezado a formar cristales, éstos se separan de la parte aun fluida según su densidad, reuniéndose los más pesados en la parte más profunda. Por fin algunos entienden que la diferenciación es simplemente una consecuencia de la disminución de temperatura mayor en la zona periférica, que determina la solidificación de los elementos por orden de su fusibilidad, siendo, según estas dos últimas hipótesis, las rocas periféricas las más ácidas.

La separación de minerales por orden de su fusibilidad no puede hoy admitirse, que los hechos observados demuestran exactamente lo contrario; el microscopio enseña que los minerales se han separado por orden de basicidad decreciente, es decir, primero los más ricos en Hierro, Magnesio y Calcio que son también los más fusibles; después los ricos en alúmina y alcalís y por fin la sílice libre, el Cuarzo que es, de los minerales que constituyen el granito el menos fusible y que debía por ello haberse separado el primero.

Tampoco puede admitirse una diferenciación por sedimentación de los minerales separados del magma, según su peso específico, pues entonces, siendo los minerales más densos los primero separados, habría en el fondo del batolito una gran masa de roca ultrabásica y en la superficie una espesa capa de roca ultraácida; a medida que profundizamos en el batolito o lacolito, deberíamos encontrar rocas de densidad creciente, más pobres en Cuarzo y más ricas en anfíboles, piroxenos, Magnetita, etc. ¿Es esto lo que demuestra el estudio de los macizos eruptivos? Generalmente es todo lo contrario; la zona periférica se compone de rocas más básicas que la central y la acidez aumenta con la profundidad.

Así en los macizos graníticos se conocen como facies periféricas, sienitas, dioritas y gabros; en las capas menos profundas del granito, aunque empieza a ser abundante el cuarzo conserva el anfíbol y hay mucha biotita (granitos sieníticos) y por fin en las capas profundas, el feldespato y el cuarzo forman casi toda la roca, quedando la Biotita reducida a un mineral poco más que accesorio. En las regiones donde la erosión ha cortado el batolito hasta bastante profundidad, como ocurre en Galicia y en la Meseta central Española, el granito es muy ácido, mientras que en la cadena costera catalana, donde cubierto por espeso manto de sedimentos primarios, afloran al pie de las montañas las capas más superficiales, el granito es muy básico (Pedralbes, Teyá, Caldas de Montbuy, etc.) entrando en su composición la mica, en tanta o mayor proporción que el cuarzo, y esta basicidad no puede atribuirse a la asimilación de los sedimentos cámbricos o silúricos que en toda la región son muy ácidos (cuarcitas y esquistos arcillosos principalmente) (1).

En los lacolitos se observa lo mismo y hasta en los diques o filones encontramos muchas veces una región central ácida que pasa insensiblemente a la pe-

(1) M. San Miguel. Apuntes de Geología geognóstica y estratigráfica. Barcelona, 1915.

riférica básica. Este hecho se ofrece de modo clarísimo en los llamados filones compuestos, como los célebres del Trusental, en Turingia, que se componen de dos rocas distintas, pórfido granítico o sienítico en el centro y un melafido en los bordes, lo que puede explicarse fácilmente suponiendo que por la grieta ascendió un magma homogéneo de composición media y que las dos rocas que hoy forman el dique son producto de su diferenciación.

Quedan entonces como probables sólo los procesos de diferenciación por división de un magma homogéneo en dos magmas inmiscibles y separados—teoría de la licuación—o los determinados por corrientes de difusión existentes en el magma mismo, que transportan los elementos básicos en una dirección y los ácidos en la opuesta—teoría de la difusión.

La primera está ya desarrollada en la hipótesis de los núcleos de Rosenbusch; sus magmas π y φ serían líquidos inmiscibles. En favor de esta teoría se puede apuntar la existencia de límites claros y precisos entre los diques complementarios formados por diferenciación que Brögger ha descrito, pero no debemos olvidar que este caso no es general, sino que son más las regiones en que se observa una larga serie de términos intermedios entre los diques complementarios.

Otros muchos hechos se oponen a esta teoría; si la diferenciación diera lugar a dos líquidos no miscibles, es natural que se colocaría el más ligero encima del más denso, como el aceite nada sobre el agua; cuando estos dos líquidos se solidifican, debían producir rocas ligeras (ácidas) el superficial y básicas (pesadas) el inferior; ya he indicado antes que los hechos demuestran para la inmensa mayoría de los macizos eruptivos una disposición inversa, rocas básicas y pesadas en la zona superficial, ligeras y ácidas en la central.

Los partidarios de esta teoría suponen que el magma básico que se colocó encima del ácido menos pesado, se solidificó rápidamente por el enfriamiento experimentado en el contacto con las paredes del batolito y así pudo quedar en esa posición anormal; pero entonces, se nos ocurre que debíamos encontrar inmediatamente debajo de estas rocas básicas periféricas, otras muy ácidas, cosa que no sucede, pues ordinariamente se pasa por tránsitos insensibles a las rocas más ácidas del centro del macizo. Por otra parte los filones o diques prueban que después de efectuada la diferenciación, debió el magma conservar su fluidez, que sino no hubiera podido ascender por las grietas preexistentes.

A pesar de los muchos argumentos que podría poner en contra de la teoría de la licuación, es indudable que en algunos casos es aplicable y principalmente en la formación de zonas concéntricas al núcleo, que debió tener lugar cuando nuestro Planeta era una masa fluída-ígneas, ya que no puede concebirse que en su fase estelar toda su masa fuera homogénea, y que la densidad media del Globo nos indica que el peso específico de sus materiales aumenta con la profundidad.

Queda pues como la más probable, entre las teorías hasta hoy expuestas, la de la difusión. En numerosos casos es evidente que el proceso esencial de la diferenciación ha sido una concentración de ciertos elementos del magma a lo largo

de las superficies de enfriamiento. ¿Qué combinaciones se concentran en esta zona periférica? Las que primero se separan del magma por enfriamiento, las que cristalizan primero; según esto debe existir en todas las rocas un manifiesto paralelismo entre las series ordinarias de diferenciación y la de cristalización. Tal paralelismo existe en efecto y hasta ahora ningún hecho opuesto se ha observado. La explicación de este hecho, la causa de esta concentración, no es aun conocida con certeza; a que sea la licuación se oponen los hechos expuestos, la difusión según el principio de Soret, o ley de Van't Hoff, tampoco es suficiente y son menos explicables aun por las teorías de Michel-Levy y Johnston-Lavis.

A pesar de resultar ciertas inexactitudes al aplicar a la diferenciación el principio de Soret, no cabe duda que están más conformes con las observaciones geológicas los resultados de su aplicación obtenidos, que los de cualquiera otra ley o principio de los muchos que se han aplicado. Es indudable que las condiciones de solubilidad de los magmas son la causa prima de toda la diferenciación y que no ha obrado ninguna fuerza independientemente de la solubilidad; según Brögger las combinaciones más difícilmente solubles se difunden hacia la superficie fría. En todo magma que experimenta una larga diferenciación se concentran los minerales menos solubles en la superficie y forman una capa de rocas ricas de estos elementos, mientras que los minerales más solubles permanecen más tiempo en el magma y se van, por orden de mayor solubilidad, reuniendo en el centro. Ahora bien, los hechos observados demuestran que en las condiciones de una fusión silicatada hidatopirógena, los minerales que más tiempo han estado disueltos son el cuarzo y los feldespatos, puesto que han cristalizado los últimos, y aquellos para quienes las condiciones de solubilidad desaparecieron pronto a consecuencia del enfriamiento, serían los sulfuros, óxidos y silicatos ferromagnésicos que son los que primero cristalizaron.

Si en la naturaleza encontramos hechos numerosos que lejos de desvirtuar esta suposición la robustecen, ilógicos seríamos no teniéndola en cuenta y no admitiéndola, en tanto que otra teoría más en armonía con los hechos observados sea expuesta.

Dos hechos casi universales apoyan la concentración de elementos básicos en los bordes y de ácidos en el centro de batolito, por corrientes de difusión hacia cada una de estas regiones, superficial y central: uno, es la existencia en la inmensa mayoría de los macizos eruptivos de facies periféricas básicas, (1) ricas en aquellos minerales que se separan los primeros por disminución de la temperatura. Si la opinión antes expuesta fuera cierta, las condiciones de solubilidad de las diversas combinaciones existentes en el magma debieron haber regulado la serie de difusión hacia el exterior y el interior de la masa magmática y el aumento en la zona periférica de la proporción de F_2 , Mg y Ca (magma π) y de

(1) Los ácidos tienen otra significación y origen, son consecuencia de condiciones especiales de consolidación.

Al. Na o *K* en la central (magma φ) no puede explicarse actualmente más que por la existencia de corrientes de difusión de los cuerpos menos solubles hacia la superficie de enfriamiento y de los más solubles hacia la región central.

La causa de esta difusión es hoy discutida y tampoco conocemos de modo cierto la fuerza que la orienta, pero su existencia es indiscutible.

El otro hecho favorable a esta teoría es la existencia de una serie de cristalización u orden de separación de minerales en el magma. Por las leyes de la solubilidad, deben cristalizar primero, en un magma que se enfría, los minerales menos solubles para la nueva temperatura alcanzada, y los últimos que cristalicen serán aquellos cuyas condiciones de solubilidad se conservan para temperaturas más bajas. Ahora bien, la aplicación del principio del idiomorfismo de los minerales petrográficos a la determinación del orden de formación de los componentes de una roca, nos enseña que los minerales cristalizan según el siguiente orden: 1.º Apatito, Magnetita, Espinalas, Zircon, Titanita y otros óxidos y Sulfidos. 2.º Olivino, Biotita, Piroxenos, Anfíboles. 3.º Feldespatos. 4.º Cuarzo, luego los minerales menos solubles son los ferromagnésicos y los más los aluminico-alcalinos.

Se ve bien claro que las condiciones de solubilidad han determinado, no sólo las series de difusión (rocas básicas en la perifería y ácidos en el centro), sino también las de cristalización, y con ello queda demostrado y explicado el paralelismo entre las series de diferenciación y de cristalización.

Suponen algunos petrógrafos, que las corrientes eléctricas son la fuerza que determina y orienta esta difusión, pero esto, por hoy, no es más que hipotético, y tiene como único fundamento experimental la separación de sílice en el ánodo por electrolisis de un vidrio artificial; como no sabemos si el centro del batolito ha obrado como ánodo y la superficie como cátodo, nada podemos concluir con seguridad de acierto.

Muchas otras causas o factores se han indicado como determinantes de este proceso de diferenciación; para no fatigar más vuestra atención me limitaré a indicar, que en todo caso éstas son físicas y químicas; a las primeras corresponden, la disminución de temperatura y la diferencia de temperatura entre las partes central y periférica de las grandes masas de magma; a las segundas, los cambios de composición y de condiciones de equilibrio químico producidas por la pérdida de gases y vapores a consecuencia de la disminución de presión, las especiales condiciones de los magmas cuando alcanzan el punto eutéctico y los procesos que hasta llegar a él tienen lugar en todo magma.

Además de estas causas de diferenciación, es preciso tener en cuenta que los magmas pueden, en casos muy especiales, mezclarse en proporciones variables y originar otros de naturaleza distinta y que su composición puede variar por asimilación de inclusiones extrañas y de las rocas próximas a él, como elocuentemente demuestran, el enriquecimiento de elementos básicos de los granitos del Pirineo que han digerido masas calizas.

Según lo que he indicado, las propiedades químicas de un magma inicial, se transmitirán a los magmas parciales (consanguinidad) y las rocas eruptivas de una región, si son del mismo período eruptivo, presentarán ciertos caracteres químicos y mineralógicos, que determinan ese aire de familia común a todas las rocas de una misma provincia petrográfica.

Para terminar, trataré, aunque sea muy a la ligera, de una cuestión íntimamente relacionada con la diferenciación y que es un apoyo más con que puede contar la teoría de la difusión: la del orden de erupción de las diversas rocas de un macizo eruptivo.

Para muchos autores en todo período eruptivo comenzará la serie por términos muy ácidos, que por ser los menos pesados nadarían como una espuma del magma; más tarde vendrán rocas intermedias y la serie terminará por tipos muy básicos, que por su mayor densidad se reunieron en la parte más profunda. Otros petrógrafos ven en la serie un orden contrario; primero hacen erupción los tipos más básicos que son los formados en la zona periférica por cristalización de los elementos menos solubles y por difusión hacia la superficie de enfriamiento de estas mismas substancias; sigue la erupción de rocas intermedias y termina el período eruptivo con rocas ácidas, que proceden de la parte central del magma donde se reunieron los elementos más solubles. Para otros por fin empieza la serie por rocas intermedias procedentes del magma poco o nada diferenciado, continuándose por otras más básicas o más ácidas.

De la serie ácida básica son partidarios, con Michel-Levy, los geólogos franceses. De la básico-ácida los alemanes y muchos ingleses y americanos, siendo Brögger su más ardiente defensor, con sus series de Cristianía y del Tirol. El principal mantenedor de la serie intermedio-ácida (o básica) es Iddngs.

Es evidente que puedan presentarse series de erupción según las tres principales opiniones, toda vez que los autores que las defienden, se apoyan en ejemplos tomados de las regiones petrográficas por ellos estudiadas; sin embargo, creo que la serie más frecuente, para rocas de profundidad por lo menos, es la básico-ácida, pues ésta es natural consecuencia de la separación de especies minerales en orden de su menor a mayor acidez, de elementos negros a blancos.

Los partidarios de la serie básico-ácida reconocen que en muchos casos, al final del período eruptivo aparecen de nuevo rocas muy básicas, lo que se explica según Brögger, por la acumulación en la parte inferior de la cuenca magmática, de los minerales más básicos, que son también los más pesados, que cristalizaron cuando el magma aún era muy fluído y cayeron al fondo.

*

* *

Una sola cosa habréis podido deducir de todo cuanto he dicho, y es, que el problema petrogenésico es vastísimo, que son muchos los obstáculos que han de

vencerse hasta tener un camino seguro y cómodo para llegar al término de nuestras aspiraciones y que precisa el concurso de inteligencias dedicadas a diversas ciencias, para desarrollar los múltiples temas actualmente iniciados en la Petrografía.

Si consiguiera con lo expuesto despertar la afición a estos estudios entre los sabios, físicos, químicos y geólogos de esta Academia y de España, habría hecho un señalado favor a la Ciencia y a la Patria y vería en este día el más grande de mi vida científica y uno de los más gloriosos para esta docta Corporación.

Barcelona 30 de abril de 1916

DISCURSO DE CONTESTACIÓN

por el académico numerario

DR. D. CARLOS CALLEJA

SR. PRESIDENTE:

SEÑORES ACADÉMICOS:

SEÑORAS Y SEÑORES:

Al ocupar en la solemnidad de hoy este sitio, cumplo con dos deberes, gratísimos ambos para mí, uno que me impone esta Corporación al representarla para dar la bienvenida a un nuevo compañero, y otro que solicita la amistad, para que sea yo el que os presente al flamante académico, que de hoy en adelante, y Dios haga que sea por muchos años, ha de compartir con nosotros las tareas de esta casa, a la que todos hemos de profesar singular afecto, y a la que hemos de ofrendar nuestra labor científica, para que esta labor, cobijada por ella, se difunda e irradie por todos los ámbitos del mundo científico, contribuyendo cada uno en la medida de sus fuerzas al progreso humano, en nombre de nuestra madre España.

Digo que uno de los deberes que cumplo gustosísimo es el de la amistad, porque en efecto, profunda y muy sincera es la que yo profeso al Dr. San Miguel, y aunque ella no data de luengos tiempos, he tenido ocasiones múltiples de conocer a fondo a nuestro nuevo compañero, dado el trato casi diario, la vida científica en común, y mil vicisitudes, en las que el hombre se presenta desnudo de conciencia, sin la máscara que impone el continuo trato social. Quizás tuvo esto en cuenta la Academia al designarme para contestar al discurso del recipiendario, ya que otras circunstancias no debieron pesar en tal designación, pues si así hubiera sido, a buen seguro que cualquiera de vosotros, queridos y respetables compañeros, hubiérais ocupado este sitio con más motivo, con mejor derecho, y más a satisfacción de tan ilustrada concurrencia, a la que no puedo ofrecer otra cosa que mi buen deseo, y sobre todo la formal promesa de cansarla poco, molestarla lo menos posible, y procurar no aburrirla con disquisiciones abstrusas, que si son pasables cuando quien las dice está investido de una alta autoridad científica, son intolerables cuando se exponen por quien carece de ella, y ni aún puede vestir sus pobres ideas con el oropel de una forma verbal irreprochable o deslumbradora. Y basta ya de disculpas, pues bien pudiera suceder, que tratando yo de sin-

cerarme, produjera en vuestro ánimo el efecto contrario, que en fuerza de querer ser modesto os resultara un empalagoso insoportable que quiere entrar en el santuario de vuestra confianza y benevolencia, con la ganzúa de una falsa humildad, encubridora de una inaudita soberbia.

El nuevo académico es uno de aquellos ejemplos de lo que puede la voluntad en el terreno científico: joven, muy joven, quizás el académico de menos edad en España, se ha formado ya un nombre en una rama tan difícil de la Historia natural, como la Geología; y lo ha conseguido por sí mismo, trabajando mucho, estudiando continuamente, y pasando gran parte del tiempo en el laboratorio y en el campo. Mérito es este no pequeño, pues el que contó con maestros sabios que le iniciaron en las verdades de la ciencia, que le condujeron a través de las hipótesis y teorías, le dieron hecho la mitad del camino y ya no tuvo más que seguir el impulso adquirido, pero quien como San Miguel hubo de iniciarse a sí mismo, corregirse, evaluar las hipótesis para escoger la que se halla más próxima a la verdad, ese tiene doble valer como investigador. Pero estas condiciones que en último término, no serían otra cosa que la expresión de una buena voluntad, no son suficientes para justificar que una corporación como nuestra Academia llamara al Dr. San Miguel para que forme parte de sus miembros, sino hubiera visto otras condiciones en él que le hacen digno de ser uno de los individuos que el día de mañana han de dar días de gloria, yo así lo espero, a esta Corporación.

En efecto, nuestro nuevo compañero a los pocos años de terminada su carrera, obtuvo por oposición la Cátedra de Geología que hoy desempeña en la Sección de Naturales de la Facultad de Ciencias de esta Universidad, y he de deciros que el Dr. San Miguel es uno de los mejores maestros, por lo mucho que sabe, la claridad con que lo expone, y el cariño con que enseña procurando resolver cuantas dificultades surgen en la mente de sus alumnos; y conste que de estas cualidades del Dr. San Miguel no hablo por referencias; sé por propia experiencia lo que vale, pues me honro con el título de discípulo suyo. Como investigador, de sobra le conocen los que a Petrografía o a Geografía se dedican, y saben que aunque muy joven su labor científica es ya relativamente copiosa, y que en un lapso de tiempo muy corto, ha publicado, interesantes monografías como las que llevan por título "Un nuevo yacimiento de Pirolusita en el Molar (Madrid)". *Contribución al estudio de las dunas de la Península Ibérica*. "Nota sobre una excursión por la provincia de Gerona". "Datos para la estratigrafía de Montjuich". "Variaciones de la costa de Huelva en el período histórico"; ha dado a la estampa el año próximo pasado unos *Apuntes de Geología geognóstica y estratigráfica*; y ha traducido del alemán una obrita tan amena como instructiva sobre "*Los continentes y los mares: sus variaciones en los períodos geológicos*".

Creo que sobran ya motivos para justificar su elección como individuo de número de esta Real Academia, pero si aun quedara alguna duda sobre la valía del Dr. San Miguel, se habrá desvanecido después de la lectura del discurso que

acabáis de oír, en el cual habréis podido convenceros de la copiosa y sólida erudición del nuevo académico, de la claridad en la exposición de los hechos, y de la seriedad con que aprecia las hipótesis como tales, juzgándolas con buen espíritu crítico.

Quizás la lectura de tan interesante trabajo haya dejado en vuestra mente cietro dejo de desaliento al ver que como ocurre en otras ciencias, en Geología, las hipótesis abundan, los hechos conquistados como verdades incontrovertibles son relativamente escasos, y que el hombre de ciencia ha de contentarse en muchos casos con el desesperante *ignorabimus*.

Parece a primera vista que una rama de la Geología, tan a nuestro alcance como es la Petrografía, debiera al estudiar las rocas tener resueltos ya todos los problemas, pues a éstas las conocemos en su forma, en su estructura macro y microscópica, en su composición mineralógica y química, pero hemos de confesar que comienzan a surgir las dificultades cuando al interrogar no nos contentamos con la respuesta a la pregunta: *¿qué es esta roca?* sino que pretendemos obtener contestación categórica a la inquisitiva interrogación, *¿por qué es así?* Y estas dificultades suben de punto al inquirir la causa que colocó a la roca en tal sitio, la hizo tener tal composición, y la señaló tal forma y tal estructura.

Pero ante tamañas dificultades el hombre de ciencia no debe desanimarse, antes al contrario ellas deben servirle de poderoso acicate que le impulse a investigar cada día con mayor ahinco, aunque también con la plena convicción de que la resolución de un problema, planteará nuevas cuestiones que han de ser asimismo resueltas, para a su vez engendrar otras; que al fin y a la postre el desarrollo científico y la posesión de la verdad se asemeja mucho a esas moléculas orgánicas de los seres vivientes en constante apetencia de saturación, y jamás saturadas, en permanente desequilibrio químico, mientras dura la vida, ya que la razón de ésta, en la esfera puramente somática, es ese mismo desequilibrio. A buen seguro que si el hombre tropezara en sus estudios con una ciencia completamente constituida, no sentiría el afán de la investigación, y de aquí que cuanto más en período constituyente se halle un grupo de conocimientos, tanto más ha de despertar la sana curiosidad, tanto mayor número ha de ser el de los investigadores que traten de resolver los problemas planteados, y tanta mayor eficacia en la disciplina mental, que no hay mejor educadora de la mente que la investigación original, contenida siempre por el freno de la lógica.

Con lo que nos ha dicho el Dr. San Miguel en su discurso ocupándose de punto tan concreto en Petrografía, como el del *origen y formación de los magmas eruptivos* podemos sacar el convencimiento de que los problemas petrogenésicos se hallan aún planteados pero no resueltos, y hay que agradecer al nuevo académico su llamada, indicándonos uno de tantos aspectos de la cuestión, y sus excitaciones, no sólo a los geólogos, sino que también a los físicos y a los químicos para que contribuyan con sus conocimientos y con sus métodos al esclarecimiento de hechos de tan alto interés científico. Que este estudio ha de ser muy prove-

choso en sus resultados no cabe negarlo, quizás la aridez del asunto retraiga un poco a los investigadores, pero como dice muy bien el Dr. San Miguel esta aridez es sólo aparente, pues si en lugar de estudiar las rocas en su aspecto estático actual, las estudiamos en sus cambios dinámicos, si valiéndonos de una imagen, consideramos la roca viva, influída por los agentes externos, reaccionando frente a ellos, transformándose en suma, y si además de esto pretendemos darnos cuenta de su origen, de investigar la serie de causas en virtud de las cuales los minerales que la componen se han agrupado para que la roca *nazca*, valga la expresión, es innegable que tal investigación se reviste de un interés tan grande, es su estudio tan sugestivo que no cabe dudar, han de ser numerosos los hombres de ciencia que dediquen sus actividades al esclarecimiento de los problemas petrográficos. Y es natural que así ocurra, pues satisface al espíritu humano, es preciso al acicate de lo desconocido, es necesario que para resolver un problema se plantee previamente una hipótesis, que será confirmada o rectificada según el resultado que se obtenga.

Habréis visto en el notabilísimo discurso del nuevo académico, que la Geología estudiada como modernamente se estudia es una ciencia atractiva que ha de satisfacer no sólo la inteligencia, sino que además habla a la imaginación, en suma, que al lado de la conquista de los hechos, fríos en su presentación, hállese la movilidad poética de lo que cambia, de lo que se transforma, de lo que se destruye para dar origen a nuevas formas, a nuevos seres, que a su vez están destinados a cambiar, a transformarse y a destruirse, Y es que no hay ciencia que no tenga su matiz estético, es más, entiendo que la mejor fuente de inspiración es ella, y especialmente cuando se dedica al conocimiento de la naturaleza. Pues qué, ¿por ventura no es sublime el espectáculo de una erupción volcánica? ¿no vá más allá de los límites de lo bello, pensar en la serie de fenómenos que se han sucedido para la formación de esos magmas eruptivos de que nos hablaba el doctor San Miguel? Pero para llegar a apreciar estas emociones estéticas es necesario conocer la ciencia geológica. En lo que el vulgo no ve más que una masa inerte, fría que nada le dice a su imaginación, el geólogo verá no sólo la roca sedimentaria o eruptiva, sino que asistirá con su fantasía y gracias a los conocimientos que tiene, a la serie de cataclismos que la han dado origen, y en unos casos presenciara como el agua despeñándose en imponente cascada la ha desgastado, o como en mansa corriente de cristalino o turbio río, fué depositando capas nuevas que cambiaron su estructura, como el hielo infiltrándose entre las grietas la desmenuzó o la pulimentó, como el viento ha ido arrancando poco a poco sus partículas para darle nueva fisonomía; o en otros, como una masa fundida de deslumbrante aspecto, fué poco a poco enfriándose, y como esa masa se abrió paso a través de capas diversas para ofrecerse a la curiosidad del hombre, que la estudia en su forma, que la investiga en su estructura y que la interroga, para que ella le responda dándole noticias de su origen y vicisitudes.

¿Cuán diferente es la emoción de lo bello en el hombre que al contemplar una

montaña no ve en ella más que lo que en aquel momento se le ofrece, de la que siente el geólogo que ve no sólo el momento actual, sino que asiste con su imaginación a la serie de fenómenos que la dieron origen!

Perdonadme que haya distraído vuestra atención, no os canso más, pero antes de terminar permitidme que haga votos porque el Dr. San Miguel, nuestro nuevo compañero, no cumpla el ciclo evolutivo que él ha señalado a los magmas eruptivos, que ya que pasó el período *prehistórico* de su niñez, y el *intratelúrico* de su carrera, y hoy se nos ofrec en el de *erupción* de su saber y de sus actividades, no llegue el de *alteración*, sino tras de luengos años de una vida dilatada y provechosa para la Ciencia y para la Patria, y que la medalla que vais a imponerle, Sr. Presidente, sea a manera de fermento catalizador que avive las reacciones de su inteligencia y nos dé como sazonado producto de su actividad, nuevos trabajos científicos que sean honra de la Academia, envidia de extraños y satisfacción de nuestra amada España.

HE DICHO