

EL ORIGEN DE LOS GRANITOS

POR MARIO E. TERUGGI

Lógico es suponer que, para esta época, la mayoría de los geólogos argentinos — aun aquellos que por razones de trabajo se encuentran alejados de los centros bibliográficos o de intercambio de ideas — habrán leído u oído algo sobre el problema de la granitización. Esta cuestión, que ha dividido el campo petrológico en dos sectores antagónicos, y ha suscitado contiendas, escritas o verbales, enconadas y violentas, es de enorme importancia, tanto para explicar el origen de las rocas plutónicas como para interpretar la formación y diferenciación de la corteza terrestre. No obstante su trascendencia, el problema del origen de los granitos no ha sido hasta ahora presentado sucintamente en castellano, salvo algunas referencias parciales (González Bonorino, 1946) y alguna que otra publicación española (San Miguel Arribas, 1951) de no fácil obtención.

Con el propósito de suplir esa deficiencia en los países de habla castellana — pues en otros son numerosísimos los trabajos sobre granitización — he redactado el presente artículo, destinado a dar al geólogo general una idea panorámica del estado actual de la cuestión ¹.

Yendo directamente al núcleo del problema, la granitización puede definirse como : « el conjunto de los procesos mediante los cuales las rocas se convierten en otras de carácter granítico sin pasar por un estado magmático ». En otras palabras : que para la formación de los gra-

* Esta publicación inicia la serie dedicada a monografías sobre temas de interés general para el geólogo. La continuidad de la misma dependerá de los artículos disponibles y, por consiguiente, se invita a los socios a enviar contribuciones. Serán particularmente bienvenidas las síntesis sobre el estado actual del conocimiento de la geología, petrología, paleontología, etc., de las distintas regiones de nuestro país.

¹ He tratado de mantener, en este artículo, una actitud objetiva. Debo aclarar, sin embargo, que mi formación petrográfica se hizo bajo la influencia de H. H. Read, una de las principales figuras de las corrientes granitizacionistas.

nitos no es necesaria la intervención del magma, lo cual, simplemente, equivale a negar el origen magmático de los mismos. Y como los granitos¹ constituyen cerca del 95 % del total de rocas intrusivas, o plutónicas, de la corteza terrestre, es obvio que lo que en realidad se discute es el modo de origen de casi todas las rocas plutónicas.

Para el geólogo argentino, cuyos conocimientos petrográficos derivan, en general, de los preceptos de la escuela clásica alemana, la negación de la participación de los magmas en la génesis de las rocas plutónicas podrá parecer quizá un despropósito irreverente. En efecto, está tan arraigada en nosotros la tradicional teoría magmática, que nos parece un truismo, y, como dice Read (1943): «nos induce a creer que, si alguien duda de que los granitos sean magmáticos, es un deficiente mental, un deshonesto intelectualmente o un iconoclasta imperdonable».

No obstante el arraigo de las ideas magmáticas, las granitizantes son igualmente antiguas, si bien inadvertidas a causa del desarrollo de la petrografía rosenbuschiana. Conviene entonces, antes de tratar las principales teorías sobre el origen de las rocas eruptivas, presentar cronológicamente la evolución de las ideas granitizantes o transformistas.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La primera explicación plausible sobre el origen de los granitos — descartada la teoría neptuniana — se debe a Hutton (1795), quien, procediendo por comparación y analogía, llegó a la conclusión de que granitos y basaltos se originan en la misma forma, o sea por consolidación de material que se ha hecho fluido por la acción del intenso calor (ignis) del interior de la corteza.

Algunos años después, en 1824, el austríaco Ami Boué insinúa la primera posibilidad de granitización al afirmar que el calor ígneo y las emanaciones gaseosas del interior de la tierra habrían dado a los esquistos, paulatinamente y bajo compresión más o menos fuerte, una especie de licuefacción ígnea. Ya en la década de 1830, en su clásica obra *Elements of Geology* (1838), Lyell dividió las rocas ígneas en cuatro clases: ágneas (sedimentarias), volcánicas, plutónicas y metamórficas, estableciendo que las volcánicas y plutónicas se han formado por la consolidación de una masa fundida. Esta masa, en su opinión, se originaría por acción plutónica, pero agregaba que esta influencia plutónica ha sido a veces «...en escala tan grande, que no debemos considerar que los estratos han adquirido siempre su textura cristalina alterada

¹ Granito se emplea aquí no en su sentido petrográfico estricto, sino como término genérico para todas las rocas granudas cuarzosas, como granitos propiamente dichos, granodioritas, tonalitas y adamellitas.

como consecuencia de la proximidad al granito, sino más bien que el granito mismo, a la vez que los estratos alterados, han derivado su textura cristalina de la influencia plutónica» (Lyell, 1838, p. 19). La acción plutónica a que se refiere Lyell consistía en la influencia del calor subterráneo, actuando bajo fuerte presión y ayudada por aguas termales, vapores y otros gases. Sus ideas, que son el germen de las teorías granitizantes, fueron retomadas en Gran Bretaña unos cuarenta años más tarde, como ya veremos.

Aparte de estas opiniones de Lyell, las ideas granitizantes comenzaron a ser desarrolladas casi exclusivamente por investigadores franceses. En 1837-1838, J. Fournet llega a la conclusión de que, entre las rocas metamórficas, algunas son el resultado de simple recristalización y otras de fusión parcial, combinada a veces con migración de material. Tres años más tarde, en 1841, Sainte-Claire Deville introduce el importantísimo concepto de los agentes mineralizadores, que transforman químicamente las rocas por las que se difunden. Un nuevo avance se produce en 1844, cuando Virlet d'Aoust, geólogo de vasta experiencia en procesos metamórficos, presenta su nota sobre las rocas de imbibición, o sea, aquéllas sedimentarias penetradas y empapadas por material ígneo y transformadas en granito. Poco después, en 1847, el mismo autor acuña el término *granitificación* (l. c., p. 499) para designar la transformación de las rocas sedimentarias en granito, expresando: «...la [granitificación] que no es más difícil de admitir que su transformación en gneis; sólo basta suponer que la acción metamórfica ha sido más directa e intensa, o más prolongada».

El año de 1847 fué todavía más pródigo en estudios sobre la génesis del granito. Elie de Beaumont, en un trabajo clásico sobre depósitos minerales, distingue entre las rocas eruptivas un grupo básico o volcánico, y uno ácido o plutónico. Además, se ocupa también de imbibición y de la transformación de algunas rocas en granitos, concordando en general con Virlet d'Aoust. Fournet, por su parte, retoma el problema con motivo de una exploración geológica de los Vosgos y, si bien acepta la imbibición como proceso metamórfico, previene contra el excesivo entusiasmo sobre las transformaciones de las rocas. Esta advertencia ha tenido que ser repetida en tiempos recientes por algunos transformistas a raíz de las excesivas generalizaciones de algunos granitizacionistas a ultranza. Fournet también publica en dicho año un estudio sobre metamorfismo en los Alpes occidentales, pero en versión alemana, con un prefacio de von Cotta, quien admite la posibilidad de la transformación profunda, en pequeña escala, de las rocas sedimentarias en ígneas. En este trabajo, además de importantes contribuciones al campo del metamorfismo (tales como venación, diferenciación entre inyección e imbibición capilar, ensayo de establecimiento de zonas de metamorfis-

mo, etc), Fournet demuestra que en ciertos sedimentos metamorfozados existe más feldespato del que se puede explicar por simple recristalización, lo que evidencia que debió haber introducción de material.

Algunos años más tarde, en 1862, Scott y Haughton, al estudiar las rocas graníticas de Donegal (Irlanda), admitieron, como ya lo había sugerido Lyell, un doble origen para las mismas: magmático y metamórfico. Y en 1869, nuevamente en Francia, Delesse, que ya en 1858 se había ocupado del metamorfismo caracterizado por granitización, formula la proposición de que las rocas plutónicas son el resultado, y no la causa, del metamorfismo, admitiendo que llegan a hacerse tan móviles que pueden ser comprimidas y llevadas a niveles más altos de la corteza, donde forman granitos intrusivos que han perdido todos los caracteres que permiten determinar su verdadero origen.

Vemos, pues, que para 1870 las teorías granitizantes habían alcanzado apreciable desarrollo, debido casi exclusivamente a la escuela francesa. Por entonces aparecieron también en Gran Bretaña algunos intentos de explicar la génesis de los granitos siguiendo las líneas francesas. Así, en 1871, Green describe restos visibles de estratificación en los granitos del distrito de Errigal, estratificación que en parte había sido destruída por fusión, comportándose el material fundido en forma intrusiva. Cinco años más tarde, Clifton Ward, al estudiar el Lake District de Inglaterra septentrional, enfrenta el problema de la migración de material en la granitización, señalando que: «...aunque una simple fusión no podría haber producido nunca granito, sin embargo, una fusión húmeda, acompañada de sustancias elementales traídas de zonas aún más profundas, podría efectuar un gran transformación». Estas ideas de Ward provocaron inmediatamente (1876) la crítica adversa del gran J. W. Judd, quien expresó su completo desacuerdo con tales conclusiones. Mientras esto acontecía en Inglaterra, Zirkel, al discutir en ese mismo año los granitos del paralelo 40 de los Estados Unidos, admite que son de doble origen: magmático y metamórfico.

Pero el año decisivo en la historia de las ideas sobre la génesis del granito fué el de 1877, fecha en que H. Rosenbusch publicó su clásico estudio sobre el metamorfismo de contacto de las pizarras que bordean el granito de Barr-Andlau (Vosgos), en el que demostró, por medio de análisis químicos, que no había cambio apreciable en la composición química de las rocas metamorfozadas del contacto. Como estos resultados mostraban claramente que no había transferencia de material entre el granito intrusivo y la roca encajante, Rosenbusch, dando forma a ideas que ya existían en el ambiente, generalizó sus conclusiones negando la posibilidad de permeación de las rocas por materiales diversos e interpretando, por lo tanto, a los gneís y esquistos feldespaticados como granitos normales que han sufrido metamorfismo dinámico. El

prestigio de este petrógrafo, la afluencia de alumnos de otros países que iban a estudiar con él y luego propagaban sus ideas — repitiendo el « caso Werner » —, determinaron que las contribuciones de la escuela francesa quedaran relegadas a segundo plano o pasaran inadvertidas.

Es precisamente en esta época cuando se inicia el desarrollo de la petrografía microscópica (Zirkel y Rosenbusch en Alemania, Teall y Harker en Gran Bretaña, Williams y otros en Estados Unidos, etc.), acentuándose más el predominio de las ideas rosenbuschianas, con el resultado de que, hasta hace poco, como lo manifiesta Read (1943), la posición británica y norteamericana sobre esta cuestión ha sido esencialmente teutona. Los granitos metamórficos fueron desterrados, por lo tanto, de Gran Bretaña, y, aunque todavía en 1882 Green vuelve a incluir algunos de los granitos entre sus rocas metamórficas, sus esfuerzos no hallaron eco: por otra parte, las ideas de Ward, que habían persistido en Irlanda, decayeron igualmente ante las críticas adversas de Callaway y Bonney.

Los franceses, no obstante, siguieron aferrados a las ideas esbozadas por sus pioneros de la granitización, influidos quizá en parte por sentimientos nacionalistas (recuérdese la guerra franco-prusiana de 1870-1871). Como consecuencia, en los últimos años del siglo XIX y en los iniciales del XX, aparecieron diversos trabajos por maestros como Michel-Lévy, Lacroix, y Termier, en los que se continuó y adelantó la posición francesa. El primero se ocupó — entre otras cosas — del granito de Flamanville, Cherburgo (1893); en este trabajo hizo referencia a los fenocristales de ortoclasa que se encontraban tanto en la roca sedimentaria encajante como en los « enclaves » del interior del granito, cuya formación él atribuía a la impregnación de la roca esquistosa por material granítico, contra la opinión de Rosenbusch que veía en ellos un resultado del dinamometamorfismo. También se ocupó Michel-Lévy de la « mise-en-place » del granito, que atribuía a fusión, a asimilación o a corrosión de la roca encajante, producidas por la acción del calor y los mineralizadores provenientes del magma. Lacroix, por su parte, en sus memorias sobre los granitos de los Pirineos (1898-1899, 1899-1900), concuerda con las ideas de Michel Lévy, especialmente en lo que se refiere a la feldespatización de la roca de caja y al emplazamiento de los granitos.

Por último, Termier, en sus estudios de los esquistos cristalinos de los Alpes occidentales (1903) y de la génesis de los terrenos cristalinos (1910), difiere de Lacroix y de Michel-Lévy, pues considera que el « magma » puede interpretarse simplemente como rocas preexistentes de geosinclinal que han sido transformadas por emanaciones fuertemente energetizadas — sus « colonnes filtrantes » —, que ascienden de las profundidades y al penetrar y extenderse por las rocas sedimenta-

rias agregan energía y cambian los elementos viejos en otros nuevos. En los lugares donde la intensidad de las emanaciones es mayor, las rocas se granitizan y se transforman localmente en magma, el cual a su vez puede ascender a zonas superiores y formar intrusiones graníticas. Los elementos desplazados de las rocas preexistentes, junto con otro material migratorio, son llevados por una ola invasora y declinante de metamorfismo. En pocas palabras, para Termier, metamorfismo regional e intrusiones « son sólo los efectos de una misma causa ». En este sentido afirma: « si hay gneis en el Monte Blanco, y micacitas, no es porque el granito vino a instalarse en medio de estos estratos, sino que el granito se ha venido a formar en medio de estos estratos bajo el imperio de la misma causa que hizo de estos estratos sedimentarios terrenos cristalinos ». El metamorfismo regional se produciría por el mecanismo de la mancha de aceite, o sea que los elementos provenientes de la profundidad permean desigualmente las capas sedimentarias de la pila geosinclinal, al igual que una gota de aceite en una pila de paños.

Vemos que, para Termier, el magma granítico se genera por intensificación de los procesos que originan los esquistos cristalinos y los gneis.

Entramos ahora en la etapa más reciente de la granitización, en la que hay que citar las importantes contribuciones efectuadas por la escuela geológica fenoscándica, basadas en estudios del complejísimo basamento cristalino bien expuesto de esa región. Debe mencionarse en primer término a Sederholm, quien durante un largo período (1907-1934) y en una serie de memorias y trabajos, trató de interpretar las rocas del basamento fenoscándico, primero en acuerdo parcial con las ideas francesas — no obstante haber sido discípulo de Brögger y Rosenbusch —, y luego según líneas originales. Es muy difícil resumir en pocos párrafos las ideas de Sederholm, autor que evolucionó mucho con el tiempo y que es algo vago en el uso y definición de conceptos y términos. Comienza sus trabajos como adherente a las teorías de Michel-Lévy, y emplea repetidamente la palabra granitización, pero sin definirla nunca. Al parecer, la utilizaba como equivalente de migmatización, es decir, el proceso mediante el que se originan rocas formadas por mezcla de magma granítico y otras preexistentes; como quiera que sea, este proceso lo ve relacionado directamente con magmas graníticos, ya sean intrusivos o resultantes de la refusión en profundidad de rocas antiguas por la acción del magma (palingénesis, anatexis).

Las ideas de Sederholm sobre migmatización sufren un cambio interesante en sus últimos trabajos, en los cuales abandona la teoría de la anatexis y se inclina a creer que las migmatitas son producidas por la influencia de exudaciones graníticas, que denomina icores (del griego *ἰκός*, sangre de los dioses, plasma, suero). Los icores, definidos como una solución acuosa o un magma muy diluido, serían los padres de las mig-

matitas, y como a su vez ellos derivan de un magma granítico, resultaría que este último es el abuelo de la migmatización. Es difícil imaginar cómo los icores, en cantidades pequeñas, pueden producir anatexis en gran escala, y por ello los transformistas más recientes prefieren hablar de emanaciones, que diferirían completamente en propiedades y origen de las exudaciones sederholmianas.

Notemos que ni la escuela francesa ni Sederholm propusieron la granitización en el sentido moderno, pues aunque sostienen que el granito puede ser el término final de impregnaciones y metasomatismo, siempre hay un magma granítico de por medio. Otros investigadores, en cambio, comienzan a alejarse cada vez más de esta posición. Así, en Suecia, Holmquist (1920, 1921) sostiene, contra la opinión de Sederholm, que los gneis de vena, llamados arteritas por éste y venitas por aquél, no están relacionados con intrusión ígnea, sino que son de origen metamórfico, por fusión de partes de las rocas, en el proceso que denomina ultrametamorfismo.

Otra importante contribución fué efectuada en 1931 por Wegmann y Kranck, en su estudio de las rocas del sudoeste de Finlandia. Wegmann considera que el granito de Hängo se formó por soluciones graníticas que permearon la roca de campo y la hicieron parcialmente móvil, permitiendo que se comportara como intrusiva. Alrededor del núcleo así formado se originó un manto con enriquecimiento en distintos elementos; como el material aportado debe ser igual al extraído, se produce por fuerza una serie de reajustes químicos, que conducen a la granitización final, la que, según Kranck, se debe a metasomatismo y no a intrusión migmática. En su posterior discusión de la migmatización, Wegmann (1935, 1936) sostiene que ésta avanza como una ola por la roca de campo, dejando detrás texturas sedimentarias y tectónicas en el gneis y el granito así formados. El avance del frente migmático se produce por migración de material (*Stoffwanderung*), ya sea como átomos o moléculas, que reacciona con la roca y produce metasomatismo, pero sin que haya verdadera fusión, estando facilitado el movimiento de material por la presencia de una película intergranular o líquido intersticial. Wegmann también considera los movimientos en el substrato y en la zona migmática, para lo cual establece una superestructura (*Oberbau*) no migmática y una infraestructura (*Unterbau*) migmática. La interacción entre estas dos estructuras es complicada y larga de detallar, pero, en general, la idea de Wegmann es de que la infraestructura va avanzando desde abajo, sobre la base de la supraestructura, la que va siendo así granitizada. Fuertes plegamientos suelen afectar la superestructura, formándose lenguas de infraestructura, que recristalizan como intrusiones graníticas. Wegmann admite que el origen del material invasor no es conocido, aventurando que debe proceder

de grandes profundidades, donde puede haber sido concentrado por procesos de diferenciación y cristalización, y luego exprimido por presión.

Coetáneamente con Wegmann, Backlund (1936-1937) propone ideas similares. Según él, las rocas magmáticas se desarrollan por granitización de sedimentos geosinclinales, y el ascenso del « magma » sería el ascenso del frente migmático, constituido, primero, por elementos de radio atómico pequeño, como Si y Al, y luego por álcalis, especialmente K. Además, Backlund (1938 C) considera que la granitización comprende procesos como migmatización y anatexis, y que las emanaciones ascendentes van siendo usadas según la naturaleza de la roca a granitizar; así, en los terrenos precámbricos, las rocas de caja eran pobres en álcalis, y las emanaciones se agotaron al efectuar su granitización; en el caso de terrenos más jóvenes, las rocas de caja estaban ya feldespatizadas, de modo que no se consumen por completo las emanaciones, que aparecen entonces como pegmatitas.

Para terminar, diremos que el proceso de la granitización, especialmente en lo referente a los cambios geoquímicos necesarios para su producción, ha sido encarado en una serie de trabajos por Reynolds (1943, 1944, 1946, 1947). Esta autora ha elaborado el concepto del « frente básico », o sea que considera la granitización como un proceso de introducción de ciertos elementos en la roca de campo (especialmente Na, Ca y Si), y la eliminación de otros (Al, Fe, Mg y Ca), que constituyen aureolas o zonas en las que estos componentes están concentrados.

Llegamos así al final de nuestra breve revista del desarrollo de las principales ideas granitizantes. Al lector desapercibido le ha de parecer muy grande el número de los investigadores que, durante los últimos 150 años, han ido elaborando las teorías transformistas, pero debe recordar que en el campo magmático militaba el resto de los geólogos y petrógrafos del mundo, que eran legión.

Conviene presentara hora, para facilitar el camino, las principales teorías sobre el origen de las rocas graníticas que gozan actualmente de mayor predicamento entre los petrólogos.

PRINCIPALES TEORIAS ACTUALES SOBRE EL ORIGEN DE LOS GRANITOS

1. *Teorías granitizantes.* — En base a lo dicho, sabemos que, según los transformistas, las grandes masas batolíticas se han formado por procesos de reemplazo de rocas preexistentes, y que las substancias reemplazantes son llevadas en solución en un medio líquido penetrante

(mineralizadores, ícores, etc.). En los últimos tiempos, dijimos, han aparecido teorías que explican la granitización mediante la « difusión en sólido », o sea por un proceso de migración de iones a través de los cristales, sin que intervengan ni líquidos ni gases. En consecuencia, existen dos principales corrientes granitizantes: la granitización húmeda y la granitización seca, cuyos defensores, en el lenguaje geológico familiar inglés, se denominan « mojados » (soaks) y « secos » (dries), respectivamente.

a) *Granitización húmeda*: Es ésta, como ya vimos, la teoría inicial de los transformistas, y tiene puntos de contacto con la magmatista; actualmente, goza quizá de menos favor que la « seca ». Según ella, al producirse la cristalización de la parte exterior de la tierra, se habría originado un fluido residual que ha quedado parcialmente atrapado en la zona profunda de la corteza. El ascenso de este fluido, que es continuo, si bien en ciertos lugares puede ser más facilitado, produciría la granitización de grandes masas de la corteza, cuyas rocas, especialmente las de geosinclinal, son de esta manera transformadas sin perder el estado sólido, aunque en ciertos casos puede producirse su fusión originándose un magma granítico que, a su vez, puede ser inyectado en niveles superiores en forma de cuerpos intrusivos (reomorfismo).

Es evidente que, para producir la transformación de rocas en vasta escala, se requiere que los fluidos o ícores posean una gran cantidad de energía, lo que es difícil de explicar, aún en el caso de que se vayan renovando continuamente en su pasaje por las rocas. Por otra parte, estos fluidos, cuyo volumen es escaso frente al de las rocas a transformar, deben elevar la temperatura hasta que los minerales de las rocas geosinclinales dejen de ser estables, y luego mantenerla hasta que se haya producido su conversión en minerales de alto rango. Esta deficiencia en energía es explicada por algunos transformistas recurriendo a fluidos energizados, que derivarían su energía de procesos radiactivos.

Aparte de esto, para que las rocas de geosinclinal sean transformadas en granito, es necesario que los fluidos lleven en solución, afuera del lugar de la granitización, todo el material que no se precisa para la « fabricación » del granito, el cual, por fuerza, debe ser depositado en otra parte. Ya vimos cómo esta transferencia de material se explica mediante los frentes básicos, pero muchos geólogos niegan su existencia o sostienen que son demasiado pequeños en comparación con la extensión enorme que deberían tener para permitir el metasomatismo de grandes masas de roca.

Quedaría por fin el problema de cómo los fluidos, que ascienden del interior de la corteza terrestre, pueden efectuar una transformación en sentido ácido (granito) si provienen de una zona que, según lo demuestran los estudios geofísicos, es de naturaleza básica. Por esto, muchos

transformistas prefieren hablar de emanaciones en lugar de flúidos, emanaciones cuyo carácter, sin embargo, no está bien definido.

Como vemos, son poderosas las objeciones que se pueden hacer a la teoría granitizante húmeda. Menos vulnerable parece, en apariencia, la otra posición transformista.

b) Granitización seca: Los partidarios de la granitización seca — la teoría más reciente —, la explican mediante un proceso de migración de iones a través de los cristales que componen las rocas que han de ser granitizadas. Algunos autores (Perrin y Roubault, 1949) sostienen que esta difusión sólida — que tiene sus fundamentos en ensayos de laboratorio y en metalografía — es la única que engendra granitos, y rechazan por completo los magmas y los flúidos, emanaciones o icores; otros, en cambio, consideran que la difusión sólida puede ser dominante o única, pero que en muchos casos hay también participación de los flúidos o icores.

Los fundamentos teóricos de este proceso son los siguientes: un cristal puede considerarse, en esencia, como un espacio vacío en el cual hay partículas cargadas que, como resultado de campos magnéticos y eléctricos, se disponen en forma definida, constituyendo el reticulado espacial propio de la substancia. Las partículas — que no llenan más de 10^{-15} del espacio — están separadas por distancias relativas enormes, pero ocupan posiciones definidas, de modo que se requiere una cierta cantidad de energía para apartarlas de ellas. Sin embargo, todo cristal — salvo que estuviera a 0° absoluto — tiene defectos en su estructura fina, consistentes en posiciones no ocupadas, o en átomos en posiciones intermedias que no corresponden a la regularidad del reticulado. Naturalmente, al aumentar la temperatura (o sea, la amplitud de las vibraciones térmicas) aumenta la proporción de los defectos, hasta que finalmente el reticulado queda destruido al alcanzarse el punto de fusión del cristal.

La difusión en sólido es posible, precisamente, a causa de la presencia de defectos en la estructura, de modo que los propios iones del cristal pueden autodifundirse u otros foráneos pueden entrar. A pesar de esto, la proporción de defectos es pequeña hasta una temperatura cercana al punto de fusión; existe, por tanto, un umbral de temperatura debajo del cual la proporción de defectos es tan reducida que no puede producirse la difusión; en los silicatos, este umbral se ha calculado en 0,8 a 0,9 T, siendo T la temperatura absoluta de fusión. Parecería, pues, que la difusión en sólido es imposible; sin embargo, existen en los cristales otros defectos aparte de los mencionados, tales como los originados por tensiones o por cristalización temprana de núcleos cristalinos. Además, los campos de fuerza son más débiles en los bordes de un cristal que en su interior, y por lo tanto se requiere allí menos energía de activación

para sacar a un ión de su celdilla. En consecuencia, la difusión sólida podría comenzar a una temperatura más baja que la señalada, y la granitización sería posible.

Si la difusión en sólido es teóricamente posible, no está del todo aclarado el mecanismo mediante el cual los iones se desplazan por las rocas. Dos autores, Ramberg (1944) y Bugge (1945), han tratado de elaborar, separadamente, la teoría general de este proceso, para lo cual consideran que las rocas están como sumergidas en un sistema disperso molecular e iónico de partículas, que se mueve por los intersticios entre los minerales y por los minerales mismos, alterando metasomáticamente los componentes de las rocas. En general, ambos autores consideran que los elementos necesarios para la formación de granito son los siguientes: Si, Al, Na, K, O y (OH). Algunos de estos elementos, sostienen, pueden difundirse fácilmente a causa de su pequeño radio atómico (Al, Si); pero los otros, especialmente el O, son de radios grandes y por fuerza deben difundirse por algún mecanismo distinto; Ramberg y Bugge, y más recientemente Barth (1948), han atribuido la concentración de O en la litosfera a fuerzas compresivas que hacen, en virtud precisamente de su gran radio atómico, que ascienda hacia los niveles superficiales. Desde luego que la migración de los iones es selectiva, y se desplazan siempre que haya un gradiente de potencial químico o de actividad.

Con anterioridad a Ramberg y Bugge, dos autores franceses, Perrin y Roubault (1937, 1939) habían discutido la importancia de la difusión al estado sólido en geología y analizado el valor de las pruebas en favor del origen magmático de los granitos. Pero claro que estas pruebas también pueden interpretarse según la teoría magmática, y los magmatistas en general niegan que la difusión sólida, posible teóricamente, pueda efectuar la conversión de gigantescas masas de rocas.

Es probable que, cuando se tengan datos más precisos sobre la velocidad de migración de los diferentes iones, se podrá establecer mejor el valor de esta hipótesis. En la actualidad, sin embargo, los «secos» son combatidos por los granitizantes «húmedos» y, en especial, por los magmatistas, cuyas opiniones nos corresponde ahora esbozar.

2. *Teorías magmáticas.* — Como es bien sabido, las teorías magmáticas establecen que las rocas graníticas se han formado por la cristalización de un magma ácido en el interior de la corteza terrestre. Pero aún si se acepta la filiación magmática de los granitos, el problema se replantea si inquirimos cómo se originó el magma granítico. Veremos en seguida que las opiniones de los magmatistas en este respecto están muy divididas, y que muchos de ellos sostienen ideas que, en realidad, no son fáciles de distinguir de las de los granitizantes húmedos. Las principales teorías que se han vertido son las siguientes:

a) Que el magma granítico es el producto de la diferenciación (por cristalización) de un magma basáltico, que se encuentra debajo de la capa ácida continental y de los fondos oceánicos. Se ha calculado que para producir un cierto volumen de granito se requieren alrededor de diez volúmenes de basalto, y, por lo tanto, para que se efectúe la separación, por acción gravitativa y tectónica, de una masa granítica, se necesitaría una gran cantidad de magma basáltico. Por otra parte, según Bowen (1928), el magma basáltico deriva a su vez de la fusión parcial de una capa peridotítica profunda de la corteza terrestre, y, como se requieren nuevamente diez volúmenes de peridotita para engendrar uno de basalto, es evidente que la masa total necesaria para diferenciar y separar una masa granítica de un magma peridotítico es inmensa. Por lo tanto, resulta claro que, tanto en esta teoría como en algunas transformistas, el problema de la energía sigue en pie, y más aún su concentración en determinados lugares de la corteza en ciertas épocas (áreas orogénicas). Por otra parte, algunos investigadores (Fenner, 1929, 1931, Wager y Deer, 1939) sostienen que el fraccionamiento cristalino de basaltos origina líquidos ricos en hierro o ferrogabros, y no rocas calcoalcalinas intermedias. Pese a estas objeciones, debe de ser ésta la teoría que en la actualidad cuenta con mayor número de simpatizantes;

b) Que el magma granítico se originó por fusión de otras rocas. Hay aquí dos posibilidades: 1) que las rocas que se funden sean las de la parte inferior de la capa granítica de la tierra (sial). Esta teoría no hace más que alejar el problema, pues siempre queda la cuestión del origen de la capa siálica. 2) Que las rocas fundidas sean las de la base de una pila geosinclinal. En este caso, nuevamente, queda el problema de la procedencia de los sedimentos geosinclinales, que tienen que haber derivado de rocas ácidas o intermedias;

c) Que el magma granítico se originó por diferenciación de un magma sintético, formado por fusión de granito, u otro material siálico, en un magma basáltico. Como en los casos anteriores, se plantea el problema del origen de ese granito o del material siálico;

d) Que existen dos magmas primarios independientes en la corteza terrestre: uno que origina granito y el otro basalto. Estos dos magmas derivarían de las dos capas externas de la corteza terrestre, y el magma granítico se formaría por dos procesos: 1) fusión pura, al hundirse el sial dentro del sima (geosinclinales) o al ascender el sima caliente dentro del sial; 2) fusión selectiva, producida en relación con procesos tectónicos, que fuerzan a los materiales cuarzo-feldespáticos de rocas geosinclinales o básicas a ascender a niveles superiores, con producción de fenómenos metasomáticos.

Esta última teoría, así como parcialmente la *b)* y *c)*, tiene evidentes puntos de contacto con las ideas transformistas húmedas. La dificultad

de separar debidamente las distintas teorías, y quizá su carácter especulativo, hacen que muchos magmatistas y granitizacionistas acepten en general dos o más posibilidades para el origen de los granitos, o consideren que más de un proceso interviene en su formación.

De cualquier modo, es innegable que las teorías granitizantes han ido ganando en respetabilidad en los últimos quince años, y actualmente los magmatistas más reconocidos, como Bowen o Grout, han admitido la posibilidad de formación de granitos — en pequeña escala — por procesos metasomáticos. Así, por ejemplo, Niggli, que es la cabeza descolante de la posición magmática europea, rechaza en 1942 la posibilidad de la granitización, pero en 1947 reconoce la existencia de tres clases de granitos: « magmagranito » (magmático), « metagranito » (formado por simple recristalización de arcosas, etc.) y « migmatita-granito » (metamórfico). La posible dualidad en el origen de los granitos es aceptada hoy por casi todos los investigadores (salvo algunas pocas excepciones), y el problema se reeplantea en la actualidad desde el punto de vista de cuánto granito puede ser magmático y cuánto metamórfico; desde luego que el porcentaje dependerá de la posición que se tome: petrólogos magmatistas como Bowen, Grout, Buddington, etc., creen que los granitos metamórficos no han de ser más de un 15 % del total, mientras que transformistas como Read consideran poco abundantes los granitos magmáticos.

Vemos que, en general y siempre que se logre mantener una relativa independencia de criterio, ninguna teoría sobre el origen de los granitos, así como ninguna posición filosófica, es del todo satisfactoria. La imposibilidad de llegar a un acuerdo se debe, esencialmente, a la falta de conocimientos sobre las condiciones físicas y químicas en el interior de la litosfera. Más concreto, en cambio, es el análisis de los hechos y observaciones en que se basan las teorías; a ellos dedicaremos ahora algunos párrafos.

LOS FUNDAMENTOS Y ARGUMENTOS DE LAS TEORÍAS

Uno de los problemas más serios en el origen de los granitos es el del espacio: ¿ cómo es emplazada una masa granítica de grandes dimensiones? Hay que descartar, en casi todos los casos, la posibilidad de una intrusión violenta, ya que las estructuras de las rocas de caja no muestran generalmente señales de perturbaciones; tampoco es aceptable la teoría de Suess de que el magma llena espacios vacíos de la corteza. Una de las hipótesis más difundidas es la del *excave magmático* (*magmatic stoping*) de Daly (1903), según la cual la intrusión arranca mecánicamente bloques del techo, que se hunden en el magma hasta disol-

verse, si bien algunos fragmentos pueden persistir cerca de los contactos. Los estudios sobre granitos de ciertas regiones (Mayo, 1937), sin embargo, parecen demostrar, en base a consideraciones sobre viscosidad del magma y observaciones sobre las estructuras del cuerpo intrusivo y la roca de campo, que esta teoría de Daly no siempre es aceptable. Más recientemente, Billings (1935), adelantó la teoría de que los batolitos podrían emplazarse por el hundimiento de un segmento de la corteza terrestre a lo largo de fracturas anulares o rectas; esta explicación es factible en casos de masas pequeñas, pero es difícil imaginar cómo un batolito de grandes dimensiones puede ser intruído por este proceso.

Menos dificultades presentan las teorías que suponen que el magma puede disolver y asimilar la roca de caja, con lo que ya estamos, prácticamente, en el campo de la granitización húmeda, aunque ha sido postulada también por algunos magmatistas; para que este proceso sea factible, se requiere que el material intruyente posea gran energía. Las teorías metasomáticas, que hacen intervenir icores, emanaciones o difusión en sólido, solucionan el problema espacial, ya que no demandan la introducción de material en masa, sino una transformación de las rocas existentes. Con todo, esta cuestión está lejos de hallarse resuelta.

Un hecho sobre el que han llamado la atención numerosos geólogos es la presencia, en muchas zonas graníticas, de feldespatos — u otros minerales — de idéntico aspecto tanto en el granito como en la roca de caja, y en ciertos casos, en el mismo contacto entre los dos. Si se supone que el granito es magmático, es evidente que estos cristales idénticos se han formado en dos medios distintos: líquido y sólido. Los transformistas sostienen que esto es imposible y que los feldespatos tienen que haberse formado en un mismo medio: roca sólida. No se puede negar que este es un argumento de cierto peso, y por ello ha sido muy utilizado por los granitizacionistas. Caben, no obstante, otras interpretaciones: así, Raguin (1946) sostiene que en el momento de la cristalización de los feldespatos, el magma no era ya líquido, sino que estaba mezclado con partículas sólidas en suspensión, mientras que las paredes (roca de campo) estaban empapadas de soluciones, por lo que el medio en que cristalizaron los feldespatos era intermedio entre líquido y sólido; Shand (1948) considera que los feldespatos pueden formarse en la roca de caja si ésta contiene Si y Al y hay líquidos infiltrantes que contengan exceso de álcalis; por otra parte, Walker y Mathias (1947), al estudiar el contacto entre pizarras y granito en Sea Point, Sud África, llegaron a la conclusión de que el granito es magmático, pero los feldespatos porfiroblásticos de la roca de caja y los porfíricos de la masa ígnea se han formado por la acción de soluciones potásicas. En nuestro país, González Bonorino (1950) ha mencionado texturas porfiroides en grani-

tos de las Sierras Pampeanas, y considera que se han formado en roca sólida, pero por acción de soluciones residuales magmáticas.

Un tipo especial del fenómeno de « la double enclave » — denominación que dan algunos investigadores franceses a la presencia de feldespatos, idénticos a los del granito, dentro de fragmentos de roca de caja incluídos a su vez en el granito — es el « caso » rapakivi. Como es bien sabido, el rapakivi es un singular granito de Finlandia que se caracteriza por la presencia de ovoides de feldespato potásico rodeados de un manto de oligoclasa; los ovoides se encuentran también en la roca de caja. La interpretación del origen de la textura de esta roca ha dado lugar a numerosas teorías y a una vívida polémica entre von Eckermann y Backlund (1937, 1938); el primero la considera de origen magmático, debida a variación en temperatura, presión o concentración dentro del magma; el segundo la interpreta como un reemplazo metasomático por granitización selectiva, a causa de la porosidad y permeabilidad de areniscas jónicas. Wegmann (1938) tercia en la discusión y considera que el rapakivi se formó como avance de una granitización más completa que abarca rocas diversas. Más recientemente, Chayes (1948), analizando el problema estadísticamente en base a la cantidad de material residual e introducido, concluye que los rapakavis suecos pueden ser metasomáticos, pero los fineses no. De cualquier modo, esta cuestión sigue todavía en pie.

El problema del espacio y el fenómeno de « la double enclave » constituyen dos de los puntos centrales de las teorías transformistas, pero se han observado otros hechos en respaldo de las mismas. Así, diversos investigadores (Sederholm, 1923-1926, Perrin y Roubault, 1939) se han referido a la presencia en cuerpos graníticos de diques de diabasa, metabasita, aplita, etc., de bordes netos, pero en ciertas partes, sin embargo, penetrados o reemplazados casi por completo por apófisis graníticas. La explicación magmática de este fenómeno sería que, una vez consolidado el granito, fueron emplazados los diques; luego, por adición de agua u otros procesos, el granito sufrió una refusión y, « revivificado » en esta forma, fué inyectado en las fracturas de los diques, disolviéndolos parcialmente. Esta interpretación no aclara cómo los diques mismos no fueron refundidos en el proceso, y por ello parece más viable la explicación transformista de que los filones fueron emplazados en una roca que sufrió posteriormente una granitización metasomática selectiva, con digestión parcial de los diques. Sin embargo, tampoco está muy claro acá por qué los diques no fueron totalmente granitizados.

También se ha llamado la atención sobre el hecho de que, en el seno de muchas masas graníticas, suele haber inclusiones ricas en minerales máficos. Como estas inclusiones tienen mayor densidad que el magma

granítico, deberían haberse hundido en la masa magmática, como lo hacen, según la teoría de la diferenciación por cristalización, los cristales de olivina, piroxeno, etc. El no haberse producido este descenso es interpretado por algunos (Perrin y Roubault, 1949) como prueba de que el granito estuvo siempre en estado sólido. Estos mismos autores señalan que los distintos estados de transformación, en que se encuentran las inclusiones, indican que las reacciones han sido demasiado lentas para corresponder a la velocidad de homogenización en estado líquido, o de solución de silicato sólido, en mezclas de silicatos fundidos.

Otro hecho observado por los investigadores franceses es que, en muchos granitos, la « mise-en-place » ha tenido lugar sin perturbar las estructuras sedimentarias, y, a veces, incluso con conservación de relictos de los estratos en el interior de los batolitos, en coincidencia con la actitud de la roca de caja. En nuestro país, Heim (1946) ha mencionado brevemente un caso de pasaje de estructura sedimentaria a granito en la región al oeste de la ciudad de La Rioja. Evidentemente, resulta difícil imaginar la persistencia de orientación sedimentaria en una masa fundida y, al parecer, la suposición de metasomatismo en sólido resulta más aceptable. Sin embargo, los magmatistas sostienen que los granitos con estructuras sedimentarias coincidentes con las de la roca de caja son poco frecuentes, y, aún en estos pocos casos, podría bien tratarse de una mera granitización local de la masa sedimentaria que cubre un cuerpo magmático mucho mayor (Anderson, 1937). Por otra parte, detallados estudios por Cloos (1936), y otros autores, de la estructura interna de cuerpos graníticos, parecen demostrar que se han formado por intrusión de un magma.

Un problema importante es el de las plagioclasas zonales, comunes en muchos granitos, que los magmatistas han interpretado como resultantes de un equilibrio incompleto entre cristales y magma durante la cristalización. Según esta explicación, el contenido en anortita disminuiría desde el centro hacia el borde del cristal, con la consiguiente variación en las propiedades ópticas. El problema, sin embargo, es más complicado, pues en muchas rocas la zonación no es la normal citada, sino de tipo oscilatorio, o sea con zonas alternativamente más y menos ricas en anortita, o de tipo inverso, es decir, más anortítico el borde que el centro del cristal. Para interpretar estas variedades de zonación, se ha supuesto que, durante la cristalización, los individuos de plagioclasa no logran mantener el equilibrio — quizá por enfriamiento rápido — con el magma en que están sumergidos, y al producirse frecuentes cambios en temperatura o en presión puede originarse la zonación oscilatoria o aún inversa; algunos autores, en cambio, las atribuyen a desmezcla de fases ricas en anortita y albita durante el enfriamiento del magma. De cualquier modo, algunos transformistas sostienen que

ninguna teoría magmática puede explicar el origen de las plagioclasas con zonación inversa, y consideran que la explicación reside en el mecanismo de la difusión sólida. A esto han respondido los magmatistas que una difusión que afecta masas enormes de rocas debe por fuerza haber afectado a los cristales de plagioclasa y producido, por consiguiente, su uniformidad. Los «secos» aducen que la velocidad de homogenización de cristales heterogéneos del mismo sistema cristalino no es igual a la velocidad de difusión atómica, y, como ésta tiene lugar a temperaturas relativamente bajas, es más difícil que produzca la homogenización que la teoría magmática, que demanda temperaturas iniciales más elevadas. Juzgando objetivamente, parece que todavía no se cuenta con una teoría que explique satisfactoriamente la formación de estos cristales.

Otro hecho, que ha sido observado por los primeros investigadores de los terrenos metamórficos, es la frecuente transición: roca de campo-migmatita-granito. El origen de las migmatitas, que está relacionado con el de los granitos, se interpreta en forma distinta según el punto de vista que se adopte. La explicación magmática lo atribuye a la inyección del magma a lo largo de superficies de debilidad (esquistosidad, diaclasas, etc.) de la roca de caja, lo que origina migmatitas del tipo gneis lit-par-lit y arteritas; los vastos terrenos migmáticos del precámbrico serían, pues, zonas de inyección en las márgenes de enormes intrusiones graníticas. A esta interpretación adhiere, por ejemplo, González Bonorino (1950) al referirse a las migmatitas que bordean el gran batolito de Catamarca-La Rioja. Otra explicación del origen de las migmatitas es la que considera que la roca de caja ha sufrido una fusión diferencial, que genera un líquido granítico o pegmatítico; éste, al distribuirse en forma de venas y franjas, da lugar a migmatitas cuando cristaliza por enfriamiento. Existe todavía otra explicación, que supone un metasomatismo de las rocas de caja, efectuado por intercambio iónico entre éstas y «flúidos» diversos (icores, soluciones, jugo granítico, emanaciones) que penetran por los planos de mínima resistencia. Según la primera interpretación, la zona migmatizada y feldespatizada es una transición entre granito y roca de campo; según la última, las migmatitas representan un estadio intermedio en los procesos metamórficos que conducen a la producción de granito a partir de otras rocas; la segunda posición casi siempre presupone la presencia de un cuerpo granítico que suministre el calor necesario para la fusión.

Estas dos posiciones antagónicas se aplican a todo el campo del metamorfismo regional, en el que hay una asociación constante de granito y rocas metamórficas. Según la primera posición (y también la segunda) el granito es la *causa* primordial de las acciones metamórficas; según la última interpretación, el granito es el *resultado* final del metamorfismo

regional. Los magmatistas, lógicamente, niegan la posibilidad de que los granitos típicos sean originados por procesos metamórficos, y algunos de ellos consideran que los transformistas, al hablar de granitos, se refieren en realidad a rocas metamórficas. Esta supuesta confusión se debe a que, en muchos casos, es muy difícil distinguir entre granito y gneis; este hecho, y la casi constante asociación de gneis-granitos en terrenos metamórficos, ha sido interpretado por los transformistas como una prueba más de su origen común. Vemos, pues, cómo el problema de la granitización abarca, de este modo, todo el campo del plutonismo, o sea, tanto el origen de las rocas intrusivas como el de las metamórficas.

Diremos, por fin, que algunos magmatistas — Niggli (1942), por ejemplo — han preguntado porqué el producto final de la granitización es siempre granito. La respuesta no es fácil, pero algunas inferencias parecen insinuarse de los resultados de las investigaciones geoquímicas efectuadas por Lapadu-Hargues (1945), quien investigó la composición química de un gran número de rocas alúmino-silicatadas, desde sedimentos a micaesquistos, gneis y granitos. Al representar en un sistema de coordenadas los porcentajes de álcalis y alúmina, encontró este autor que los puntos de distribución de la proporción álcali-alúmina ocupaban un área cada vez más reducida a medida que aumentaba el grado de metamorfismo, o sea que las diferencias químicas de las rocas alúmino-silicatadas tienden a desaparecer con la intensidad del metamorfismo, alcanzándose la homogenización máxima con la formación del gneis, que químicamente no tiene diferencias con el granito. La formación del gneis y del granito sería un proceso general de la capa siálica, que tendería a eliminar las pequeñas diferencias entre las rocas superficiales, para producir un tipo único de roca.

Al llegar a esta altura, advertirá sin duda el lector que cada uno de los puntos mencionados puede ser interpretado tanto desde la posición magmatista como desde la transformista, y que cada observación u objeción de un lado encuentra la explicación o réplica del otro. Igualmente, observará que ninguna teoría es «del todo» satisfactoria. Estos inconvenientes se deben, en última instancia, a dos razones: nuestro desconocimiento, ya mencionado, de las condiciones físicas y químicas de las zonas profundas de la corteza, y nuestra incapacidad, hasta ahora, para reproducir en el laboratorio la asociación mineral de los granitos. Con todo, el geólogo general tiene una idea bastante precisa de lo que es un granito, y es sólo lógico que, después de haber leído todo lo que antecede, se pregunte: «Si, como parecen conceder la mayoría de los investigadores, hay dos posibles génesis, magmática y metamórfica, del granito, ¿cuáles son los criterios para distinguir uno de otro? A esta cuestión tenemos que volvernos ahora.

LOS DOS TIPOS DE GRANITOS

En realidad, no existe ningún modo de distinguir los dos granitos. La atribución de un origen magmático o metamórfico a una masa granítica es, antes que nada, el resultado de una actitud apriorística, que depende mucho de la enseñanza recibida, de la escuela matriz del petrólogo, o, en algunos casos, de mera inclinación personal o de moda. Una vez adoptada una posición, y acostumbrado el intelecto a razonar a lo largo de ciertas líneas, los casos de rebeldía o de apostasía son escasos. Sin embargo, el problema es inverso: debe tenderse a la adopción de una actitud inductiva, complementada deductivamente para llegar a interpretaciones generales. Cada masa granítica debería ser estudiada detenidamente para establecer su origen, que puede ser uno u otro.

Por estos motivos, algunos petrólogos (Grout, 1948; Goodspeed, 1948) han señalado cuáles son — a su parecer — los caracteres que *pueden* servir, a partir de la observación, para distinguir el origen de los granitos. Algunos de ellos son geológicos, otros petrológicos, pero en su totalidad tienen un valor muy relativo, pues les cuadra casi siempre más de una interpretación. A continuación revistamos los más importantes.

1) La forma, en un granito magmático, debe ser compatible con la de una masa flúida que ha invadido las rocas de campo. Así, la deformación de las rocas encajantes de un lacolito es evidencia de origen magmático. Sin embargo, una forma irregular e indefinida puede atribuirse tanto a granitización como a permeación de las rocas por un magma difuso.

2) Los contactos entre cuerpo intrusivo y roca de campo son comúnmente más gradacionales en los granitos metamórficos. Su presencia, no obstante, puede explicarse también mediante un mecanismo de reemplazo magmático de las paredes o, en otros casos, por inyección del magma en los esquistos circundantes. Los contactos netos, sin transiciones, lo mismo que la aureola metamórfica de contacto, se consideran indicadores de un origen magmático.

3) El aumento progresivo del grano, desde los contactos hacia el interior del cuerpo intrusivo, se interpreta como prueba del origen magmático.

4) Ciertos caracteres internos, como foliación, lineación, sistema de diaclasas, cavidades miarolíticas, etc., indican en muchos casos que se han formado en un magma plástico o bajo su influencia, comúnmente con continuación de las acciones dinámicas hasta la solidificación final. Mapeos detallados de los macizos graníticos, siguiendo los métodos de Cloos, pueden ser útiles para interpretar el origen.

5) Los « enclaves » son generalmente difusos, redondeados, irregulares o festoneados en los granitos metasomáticos; en los magmáticos, las inclusiones son más comúnmente angulosas o subangulosas, aunque puede haber efectos deutéricos posteriores.

6) Si en la parte superior del cuerpo intrusivo hay trozos de rocas de campo que se corresponden con los « roof pendants », por lo que deben considerarse como fragmentos desplazados, se tiene una indicación de excave magmático (magmatic stoping) y, por consiguiente, de origen magmático.

7) La preservación, dentro de los granitos, de la actitud de la roca de campo sugiere metasomatismo, pero igualmente puede interpretarse suponiendo que el magma ha desplazado la foliación metamórfica sin modificar ni su rumbo ni su buzamiento.

8) La textura es más uniforme en los granitos magmáticos, y si es porfírica, los fenocristales se distribuyen con cierta regularidad y están bien formados, salvo que haya habido corrosión.

9) En los granitos magmáticos, los minerales de formación temprana son euedrales y tienen bordes netos. Este hecho está relacionado con el llamado « orden de cristalización », establecido por la escuela rosenbuschiana, según el cual los primeros minerales en cristalizar son los accesorios (zircón, apatita, rutilo, titanita, etc.). Los estudios con mezclas silicatadas, sin embargo, demuestran que el silicato de zirconio y el óxido de titanio no son los primeros en cristalizar. Otra irregularidad notable en el orden de cristalización es el cuarzo, que cristaliza último en las rocas plutónicas y en cambio es uno de los primeros en las vulcanitas y en mezclas silicatadas artificiales.

Sin citar otras irregularidades — como la de los minerales que tienen (OH) —, es evidente que la explicación magmática del orden de cristalización es defectuosa y debe buscarse una más satisfactoria. Hasta ahora, sin embargo, ninguna teoría concluyente ha sido formulada.

10) Los análisis químicos, bien interpretados y utilizados, pueden indicar si han habido o no ciertas tendencias en la diferenciación magmática. Igualmente, los análisis espectrográficos de los elementos menos abundantes en la roca intrusiva y en las de caja, pueden mostrar diferencias de valor genético (Bray, 1942).

El lector advertirá cuán magros son los criterios a que se puede echar mano para distinguir los dos supuestos tipos de granito. Resulta entonces que toda la controversia entre magmatistas y granitizacionistas es de carácter teórico, pero con la diferencia de que los primeros pueden presentar un número de datos físico químicos — obtenidos del estudio de mezclas artificiales — como base para sus teorías. A lo que responden los segundos que las mezclas empleadas son demasiado simples y

que los datos obtenidos pueden aplicarse a las vulcanitas, pero no a las plutonitas; por influencia de Read (1943-44, 1948), el más dialéctico e ingenioso de los transformistas, traen a colación las palabras de Hutton, de que no se pueden juzgar « los grandes procesos del reino mineral porque se ha encendido un fuego y se ha mirado en el fondo de un pequeño crisol ».

Pese al carácter eminentemente teórico de este asunto, su repercusión es muy grande, pues afecta a los grandes problemas de la geología, como la formación de sial y sima, las causas de la orogénesis, etc. Veremos, pues, cuáles son las consecuencias inmediatas de esta controversia y sus posibles relaciones con nuevas teorías geogénicas.

CONSECUENCIAS DE LAS TEORÍAS GRANITIZANTES

1) Leyendo la literatura especializada se nota que estamos asistiendo a un proceso de liquidación o desintegración del concepto de magma aplicado a las plutonitas. El magma rosenbuschiano ha desaparecido por completo y nadie niega ya la posibilidad de la transferencia de materia hacia las rocas de caja. La palabra magma persiste en la literatura magmatista, pero no hay mucho acuerdo sobre lo que se significa con ella; Shand (1948), por ejemplo, considera que es una emulsión de una fase sólida y otra líquida, y que esta última, a su vez, está compuesta de dos líquidos inmiscibles: uno silíceo-alumínico, preponderante, y otro accesorio saturado de álcalis: este líquido alcalino puede escaparse en el momento de la intrusión del magma e infiltrarse en las rocas de caja (emanaciones ?), produciendo la granitización. Otros investigadores, en cambio, creen que el magma es una mezcla de material líquido y sólido, es decir, lo que debe llamarse migma. Por fin, ciertos magmatistas sostienen que el magma es o puede comportarse como un líquido tenue, difuso, que penetra y permea las rocas de caja.

No escapará que estas interpretaciones en poco difieren de las concepciones granitizacionistas húmedas, salvo quizá en el uso de los términos. Por eso no ha de extrañar que algunos petrólogos no tengan, al parecer, una posición definida, y que, de la lectura de sus trabajos, no se pueda deducir a qué sector pertenecen. La distinción entre algunos magmatistas y los « húmedos » no es fácil de hacer, lo que quizá augure una futura reconciliación.

2) Otra repercusión que han tenido las teorías granitizantes ha sido en el campo de la clasificación de las rocas. Si, como sostienen los transformistas, los granitos son metamórficos, es obvio entonces que no están emparentados con las verdaderas rocas magmáticas, es decir, las vulcanitas. Hay un hecho, observado desde hace tiempo, que viene en apoyo

de esta suposición: la anormal distribución y frecuencia, en la superficie terrestre, de las rocas ígneas. Las rocas graníticas, predominantes en las zonas orogénicas, constituyen alrededor del 95 % de las plutonitas; las basálticas (incluidas las andesitas piroxénicas), por otro lado, forman algo así como el 98 % de las rocas volcánicas. Esta discrepancia hizo suponer, en un tiempo, en la existencia de dos magmas primitivos, uno granítico y otro basáltico (Bunsen, 1851; Durocher, 1857; Loewinson-Lessing, 1911). Esta temprana concepción, sin embargo, ha sido reemplazada por la creencia de que la gran variedad de rocas eruptivas derivan, por diversos procesos, de un solo magma, el basáltico. Si esto es así, resulta difícil ver adonde ha ido a parar el magma basáltico (o gábrico) que originó una masa batolítica enorme, ya que, como vimos, a lo sumo un 10 % de materia granítica puede obtenerse de una masa basáltica dada.

Los transformistas, al liberar a las rocas volcánicas de su parentesco con las plutónicas, han eliminado el problema de la diferenciación magmática; ellos consideran que existe un solo tipo de magma, el basáltico, que origina exclusivamente rocas volcánicas. Las diferencias entre las asociaciones volcánicas y plutónicas fueron señaladas por Kennedy (1938), quien concluye que estas últimas se originan por refusión de la capa sílica de la corteza. Al considerarse que las rocas volcánicas no son los equivalentes superficiales de las plutónicas, debe clasificarse y dividirse en forma distinta el campo de las rocas; una propuesta en este sentido es la de Read (1944):

1. *Rocas volcánicas*: de origen magmático, generalmente básicas y no relacionadas con zonas orogénicas. Comprenden todas las rocas efusivas, más las intrusiones menores (filones-capas, lacolitos) de gabro, diabasa, andesita, traquita, etc. Las vulcanitas ácidas (riolitas, etc.), se han formado por procesos de diferenciación por cristalización.
2. *Rocas plutónicas*: de origen metamórfico, generalmente ácidas y típicas de zonas orogénicas. Comprenden dos clases: a) metamórficas propiamente dichas, como esquistos y gneis; b) ultrametamórficas, como migmatitas y granitos.
3. *Rocas sedimentarias*: marinas o terrestres. Sobre este grupo hay acuerdo general entre todos los investigadores.

Esta forma de considerar el origen de las rocas plutónicas y volcánicas, que es un retorno a Lyell, ha encontrado repercusión en descubrimientos recientes. En efecto, estudios efectuados por Palinc (1932) y Wenk (1933) sobre andesitas de Rumania, por Homma (1932) sobre andesitas de Borneo, y por Larsson (1940) sobre vulcanitas pleistocenas de la zona andina de Patagonia septentrional, demostraron, al investigarse las plagioclasas por medio de la platina universal, que los polos de (010) caen en bandas de dispersión desplazadas a la derecha de las

curvas de Reinhard o Nikitin, según fuera el caso. En 1941 Köhler coronó estas primeras observaciones mediante un cuidadoso trabajo, en el que demostró que la orientación de la indicatriz óptica en plagioclasas sintéticas y volcánicas difiere de la de las plagioclasas plutónicas y metamórficas. Los trabajos de Köhler fueron continuados por sus colaboradores, quienes sintetizaron plagioclasas y sometieron a calentamiento feldespatos plutónicos para poder continuar las curvas de este investigador. El resultado inmediato de estas investigaciones, y otras más, ha sido la demostración de la necesidad de construir nuevas curvas para la determinación de las plagioclasas volcánicas, pues las en uso pueden inducir a errores de hasta 15 % en el contenido de anortita (Köhler, 1949).

Desde luego, el descubrimiento del diferente comportamiento óptico de plagioclasas de plutonitas y vulcanitas fué inmediatamente apreciado en su valor para determinar la historia de los cuerpos graníticos. Así, Tuttle y Bowen (1950), al descubrir que la albita sintética tiene distintas propiedades ópticas y estructurales que la de las plutonitas, intentaron, sin éxito, sintetizar albita de baja temperatura, es decir, plutónica. También demostraron que la albita de baja temperatura invierte fácilmente, por calentamiento, en albita de alta temperatura (volcánica), pero la inversa no pudo ser demostrada experimentalmente. Más recientemente, Tuttle (1952) estudió la mineralogía de rocas volcánicas y plutónicas, descubriendo que no sólo hay diferencias ópticas en las plagioclasas, sino también en la temperatura de inversión del cuarzo y en la composición química de los feldespatos alcalinos. Tuttle concluye que estas diferencias pueden explicarse desde el punto de vista magmatista, pero admite que, en algunos casos — por ejemplo, cuando hay en un granito albita y microclino que han cristalizado juntos —, el origen de la roca debe ser otro que el magmático.

Naturalmente, los transformistas han comprendido de inmediato la importancia de estos hallazgos para sus teorías, y Perrin y Roubault (1951) y Reynolds (1952) han analizado estos hechos, llegando a la conclusión de que las plagioclasas, los feldespatos alcalinos y el cuarzo de los granitos (o sea, casi el 100 % de sus minerales) no pueden ser considerados como productos de la cristalización de un magma, sino que caen en la misma categoría que los minerales de los paragneis y esquistos, con lo que se justifica la división de las rocas en tres grupos: volcánicas (mágmatas), plutónicas (metamórficas y granitos) y sedimentarias.

Es este un nuevo campo que se ha abierto a la investigación, y es de esperar que nuevas contribuciones permitan llegar a nuevas interpretaciones o a la confirmación de una u otra posibilidad genética.

3) La tercera consecuencia de las teorías granitizantes se manifiesta en un campo especulativo que, en última instancia, refleja nuestro deseo de conocer la génesis y el mecanismo de formación y desarrollo de

nuestro planeta : ¿Cuál es el origen de las capas que constituyen la corteza terrestre ?

Los estudios sismológicos y las observaciones sobre la distribución de las rocas graníticas y basálticas en la superficie terrestre, han demostrado la presencia de una capa sílica discontinua, de unos 30 km de espesor, que forma las áreas continentales. Es evidente, entonces, que el origen de los granitos y de los continentes es común, y la cuestión que debe plantearse es si resulta posible explicar la génesis de las masas continentales por procesos magmáticos o granitizacionistas.

En general, las teorías magmáticas presuponen un magma primario que, al comienzo de la historia terrestre, se separó en capas de distintas densidades, yendo la menos densa o granítica hacia la parte superior. Más difícil de explicar es, en cambio, la distribución discontinua de esta capa, pero existen teorías, como la de las corrientes convectivas, que más o menos resuelven el problema.

Las teorías magmáticas exigen altas temperaturas iniciales del planeta, al igual que la teoría orogénica de la contracción defendida por Suess, que parece resurgir luego de un olvido casi total. (Landes, 1952 ; Lees, 1952). Sin embargo, no todos los científicos están de acuerdo sobre estas altas temperaturas iniciales. En la conferencia celebrada en el Rancho Santa Fe, California (Schlichter, 1950), en la que participaron geólogos, químicos, astrónomos, físicos, oceanógrafos, etc., se consideraron los principales problemas del origen y desarrollo de la tierra. La mayoría de los científicos allí reunidos se inclinó por la teoría de la acreción de Weizsäcker (1944), que explica la formación de la tierra — y de nuestro sistema planetario — por medio de la agregación, en fragmentos mayores, del fino polvo que originariamente estaba distribuido por toda la región que ahora ocupa el sistema solar. Esta teoría exige bajas temperaturas iniciales (entre 300 y 400°K); la presencia del agua, la poca abundancia de N y la escasez de gases nobles en la tierra y su atmósfera, resultan difíciles de explicar con temperaturas iniciales elevadas. Pero, a pesar de su probable origen frío, la corteza tiene que haber pasado por temperaturas superiores (1200-1500°K) que produjeron su fusión incipiente; el calor engendrado por radiactividad bastaría para esto y para mover la maquinaria geológica interna de la tierra, pero el problema consiste en saber si la fusión de la corteza ha sido local o general. Si hubiese sido general, los últimos minerales en fundirse serían los de alta densidad (olivina, hiperteno, etc.), los que se irían precipitando a través del líquido en fusión y originarían una capa peridotítica o dunítica profunda; la tendencia a hundirse de la dunita iniciaría movimientos convectivos que, según algunas teorías, están asociados con la formación de montañas y continentes. La capa peridotítica estaría supuestamente bajo los continentes, por debajo de la dis-

continuidad de Mohorovicic (25 a 40 km de profundidad); encima de ella habría una capa basáltica y luego una granítica; debajo de los océanos, por ejemplo el Atlántico septentrional (Ewing, 1946), esa discontinuidad falta, y las rocas peridotíticas estarían cerca del fondo oceánico. Esta configuración, con una capa ultrabásica o peridotítica que se acerca a los fondos oceánicos y se deprime debajo de los continentes, donde está cubierta por una espesa capa basáltica, explicaría el equilibrio isostático entre continentes y cuencas oceánicas.

Hasta aquí la teoría magmática, expuesta en forma general y encuadrada en la teoría de Weizsäcker. Pasemos a las teorías transformistas, que ya han comenzado a surgir; dos merecen ser comentadas: la de Rittmann (1938) y la de Kulp (1951). Rittmann parte de una tierra inicialmente gaseosa, en la que por pérdida de calor se van separando los elementos: los más pesados hacia el interior, los más livianos hacia la superficie. Esta separación no es total, y algunos elementos livianos quedan encerrados en el interior, y viceversa, lo que explica la presencia en la corteza de elementos pesados, como Fe, Au, Pt, Cu, etc. En el momento en que la tierra alcanza el estado de estrella roja, está ya rodeada de una atmósfera gaseosa (*pneumatofera*), formada de elementos livianos escapados de la tierra. Este escape, que disminuye al proseguir el enfriamiento, hace que se produzcan corrientes convectivas, hasta que por fin se forma una fase líquida (entre la *pneumatofera* y el interior), compuesta de silicatos de magnesio, hierro y alúmina, con algunos elementos livianos, la que finalmente origina, por enfriamiento y después de muchas refusiones, la primera costra sólida de naturaleza símica. Según Rittmann, del magma líquido primitivo no puede desarrollarse una capa siálica, y para formarla recurre a su *pneumatofera*, a la que considera compuesta de agua al estado supercrítico (además de abundante N, O, CO₂, HCl, fluoruros, cloruros, etc.), a una temperatura de más de 1000°C y bajo presiones de más de 400 atmósferas. Esta *pneumatofera* puede absorber muchos elementos químicos (calcófilos, litófilos y *pneumatófilos*) que han atravesado la capa líquida símica, de modo que cuando la temperatura desciende debajo de 800°C, pierde su poder de disolución para la sílice y los alúmino-silicatos, que se separan para formar cuarzo, feldespatos y micas; así se origina, sobre la costra símica, una *sobrecostra* pegmatítica, a la que se agregan minerales *pneumatolíticos* cuando la temperatura baja aún más (menos de 400°C). Como el planeta ha estado sometido a corrientes convectivas, la costra símica y su *sobrecostra* tienen distribución irregular.

Al seguir descendiendo la temperatura, se condensa el vapor y el agua cae sobre la *sobrecostra* y la ataca química y mecánicamente, descomponiendo y disolviendo los feldespatos; los residuos insolubles son llevados y depositados en las depresiones, donde forman los primeros

sedimentos (*Protosial*). Estos sedimentos siguen depositándose en las cuencas o depresiones — lo que explicaría la distribución irregular del sial — y son posteriormente granitizados, mientras que la sobrecostra es erosionada más y más, hasta que finalmente, por acción isostática, las zonas protosíalicas son elevadas — originando los actuales continentes —, y las de la sobrecostra, deprimidas, constituyendo las actuales cuencas oceánicas.

La ambiciosa concepción de Rittmann ha sido atacada desde distintos ángulos: isostático, químico, sedimentológico, temporal, etc. No es nuestro propósito defender o analizar posiciones, pero vemos cómo van apareciendo nuevas ideas sobre la evolución de la tierra y cómo ellas utilizan las teorías granitizacionistas. Un paso más audaz es el dado por Kulp, quien al analizar ciertos aspectos geoquímicos de los océanos, esboza los lineamientos para nuevas investigaciones y especulaciones. En su interesante estudio geológico del agua marina, Rubey (1951) había demostrado, por medio de análisis químicos, un aparente exceso de volátiles en las aguas, y para explicarlo supuso que provenían del interior de la tierra. Kulp, desarrollando aún más esto, postula que la hidrosfera se ha formado, no por condensación del vapor de agua de la atmósfera, sino por liberación de elementos del interior del planeta. La base de esta especulación está en la superabundancia de A^{40} en nuestra atmósfera, en comparación con la proporción de A^{36} cósmico. Como se sabe que el A^{40} es radiogénico, derivando del K^{40} por conversión interna, Kulp supone que el primero se ha originado del segundo a través de los tiempos geológicos, y como la cantidad de potasio en la corteza es demasiado pequeña, considera que el K^{40} ha provenido de las zonas subcrustales de la tierra. Como estas zonas subcrustales, cualquiera sea la teoría de su origen que se admita, tienen temperaturas superiores a 1000°C , el agua no es retenida firmemente en los retículos minerales y es dable suponer — dado el similar tamaño de sus moléculas — que se comportará como el A^{40} y escapará junto con él a la atmósfera. Si se puede calcular la fracción de A^{40} liberado del interior de la tierra, y si se utiliza esa fracción como índice del escape del vapor de agua, se podrá determinar entonces la cantidad de agua liberada en los tiempos geológicos. Los cálculos de Kulp muestran la posibilidad de este mecanismo, pues la cantidad de agua que se podría formar por este proceso supera ampliamente a la contenida en los océanos, la atmósfera y las rocas superficiales. Si es éste el origen de la hidrosfera, la corriente continua de agua, potasio y argón — y posiblemente otros elementos — que asciende del interior del planeta, podría transformar, en su pasaje, la corteza basáltica originaria, convirtiéndola en rocas graníticas y metamórficas en las zonas de debilidad y de actividad orogénica. Si esa agua intratelúrica contuviera alrededor de $0,1\%$ de K, esa cantidad

sería suficiente para transformar las rocas basálticas en graníticas, y los misteriosos icores, emanaciones, etc., de los granitizacionistas podrían ser nada más que una manifestación de un proceso mucho más grandioso.

Nuevos datos harán necesario rechazar o modificar estas hipótesis audaces, pero es claro que a medida que avanzan nuestros conocimientos deben modificarse las teorías antiguas o reemplazarlas por otras nuevas, y tanto en uno como en otro caso las ideas transformistas no pueden ser ignoradas.

Con estas consideraciones llegamos al fin de esta breve revista. Aclaremos que hoy, como antaño, la mayoría de los geólogos y petrólogos son magmatistas. Los transformistas, sin embargo, como todos los profetas de religiones nuevas o minoritarias, se muestran más activos y, quizá, más unidos; su número, además, va en aumento. Las dos concepciones son teóricamente posibles, y cualquiera que sea la posición que se adopte, no se puede ignorar la antagónica; mejor dicho, el conocimiento de las teorías magmatista y granitizacionista debe ser previo a la adopción de cualquiera de ellas.

La verdad puede encontrarse en alguno de los extremos o en algún punto intermedio. De cualquier modo, esta controversia, que puede parecer innecesaria, ha de ejercer una influencia beneficiosa, pues estimulará los esfuerzos destinados a aumentar nuestro saber. Las teorías granitizantes, al desafiar una concepción que era tradicionalmente aceptada, han abierto nuevos horizontes y, lo que es más, han obligado a los magmatistas a superarse en sus análisis e interpretaciones. En este sentido, su valor es muy grande y, aunque llegue a demostrarse su falsedad, son necesarias para la comprensión del desarrollo de las ideas magmáticas. Recordemos, en este sentido, las palabras del poeta William Blake, que bien se pueden aplicar a esta controversia: « Without contraries is no progression ».

LISTA DE LOS TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ANDERSON, N. G. H. 1937. *Granitization, albitization and related phenomena in the northern Inyo Range of California-Nevada*. — Geol. Soc. America Bull., vol. 48, 1-74.
- BACKLUND, H. 1936. *Der « Magmaaufstieg » in Faltengebirgen*. — Bull. Comm. Géol. Finlande, n° 115, 293-347.
- 1937. *Die Umgrenzung der Svecofenniden*. — Bull. Geol. Inst. Upsala, vol. 27.
- 1938 A. *The Rapakivi puzzle. A reply*. — Geol. Fören. Förhandl., vol. 60, 105-112.
- 1938 B. *The problems of the Rapakivi granites*. — Journ. Geol., vol. 46, 339-396.

- BACKLUND, H. 1938 C. *Zur « Granitizationstheorie »: Eine Verdeutlichung.* — Geo. Fören. Förhandl., vol. 60, 177-200.
- BARTH, T. F. W. 1948. *The distribution of oxygen in the lithosphere.* — Jour. Geol., vol. 56, 41-49.
- BILLINGS, M. P. 1935. *Mechanics of igneous intrusion in New Hampshire.* — Am. Jour. Sc., 15, 269-298.
- BOUÉ, A. 1824. *Mémoire géologique sur le sud-ouest de la France.* — Ann. Sc. Nat., t. 2, 387-423.
- BOWEN, N. L. 1928. *The evolution of igneous rocks.* — Princeton Univ. Press., 334 pp.
- BRAY, J. M. 1942. *Spectroscopic distribution of minor elements in igneous rocks from Jamestown, Colorado.* — Geol. Soc. America Bull., 53, 705-814.
- BUGGE, J. A. W. 1945. *The geological importance of diffusion in the solid state.* — Norske Vidensk-Akad. Oslo, I, Math. Naturv. Kl., n° 13, 5-59.
- CALLAWAY, C. 1885. *On the granitic and schistose rocks of northern Donegal.* Quart. Jour. Geol. Soc. London, vol. 41, 221-239.
- CLOOS, E. 1936. *Der Sierra Nevada Pluton in California.* — Neues Jahrb. Min. Geol. Paläont. Beil., Bd. 76, Abt. B., 355-450.
- CHAYES, F. 1948. *A petrographic criterion for the possible replacement origin of rocks.* — Am. Journ. Sc., vol. 246, 413-425.
- DALY, R. A. 1903. *The mechanics of igneous intrusion.* — Am. Jour. Sc., vol. 15, 269-298.
- DELESSE, A. 1869. *Études sur le Metamorphisme des Roches.* Paris.
- DUROCHER, J. M. 1857. *Essai de pétrologie comparée.* — Annales des Mines, vol. XI, 217-259.
- ECKERMAN, H. VON. 1937. *The genesis of the Rapakivi granites.* — Geol. Fören. Förhandl., vol. 59, 503-524.
- 1938. *The Repakivi facts. An answer to a reply.* — Ib., vol. 60, 113-115.
- ELIE DE BEAUMONT, J. B. 1847. *Note sur les émanations volcaniques et métallifères.* — Bull. Soc. Géol. Fr., vol. 4, 2^a serie, 1247-1333.
- EWING, W. M., et al. 1946. *Recent results in submarine geophysics.* — Geol. Soc. America Bull., vol. 57, n° 10, 909-934.
- FENNER, C. N. 1929. *The crystallization of basalts.* — Am. Jour. Sc., 5th ser., vol. 18.
- 1931. *The residual liquids of crystallizing magmas.* — Mineral. Mag. vol. 68, 539.
- FOURNET, J. 1838. *Geologische Klassifikation der Felsarten.* — Neues Jahrb., 158-160.
- 1847. *Résultats sommaires d'une exploration des Vosges.* — Bull. Soc. Géol. Fr., vol. 4, 2^a serie, 220-254.
- 1847. *Die Metamorphose der Gesteine nachgewiesen in die westlichen Alpen.* — Freyberg.
- GONZÁLEZ BONORINO, F. 1946. *Sobre migmatización y procesos afines.* — Rev. Soc. Geol. Arg., tomo 1, n° 1, 73-91.
- 1950. *Algunos problemas geológicos de las Sierras Pampeanas.* — Rev. Asoc. Geol. Arg., tomo 5, n° 3, 81-110.
- GOODSPED, G. E. 1948. *Origin of granites.* — Geol. Soc. America, Memoir 28, 55-78.
- GREEN, A. H. 1871. *Notes on the geology of part of the County of Donegal.* — Geol. Mag., vol. 8, 428-429.
- 1882. *Physical Geology*, 3^a edición.
- GROUT, F. F. 1948. *Origin of granite.* — Geol. Soc. America, Memoir 28, 45-54.
- HAUGHTON, S. 1862. *Experimental researches on the granites of Ireland.* — Quart. Jour. Geol. Soc. vol. 18, p. 403-420.

- HEIM, A. 1946. *Granitización en la Sierra de La Rioja*. — Rev. Soc. Geol. Arg., tomo 1, n° 1. 17-18.
- HOLMQUIST, P. J. 1920. *Om Pegmatit-palingenes och Ptygmatisk Veckning*. — Geol. Fören. Föhr., vol. 42.
- 1921. *Typen und Nomenklatur der Adergesteine*. — Ibid., vol. 43.
- HOMMA, F. 1932. *Ueber das Ergebnis von Messungen an zonaren Plagioklasen aus Andesiten mit Hilfe des Universaldrehtisches*. — Schweiz Min. Petr. Mitt., vol. 12, 345-352.
- HUTTON, J. 1795. *Theory of the Earth*, 2 vols. William Creech, Edinburgh.
- KENNEDY, W. Q. 1938. *Crustal layers and the origin of magmas*. — Bull. Volc., serie 2, vol. 3, 24-82.
- KÖHLER, A. 1941. *Die Abhängigkeit der Plagioklas-optik vom vorangegangenen Wärmeverhalten (Die Existenz einer Hoch- und Tieftemperaturoptik)*. — Min. Petr. Mitt., vol. 53, 24-49.
- 1949. *Recent results on investigations on the feldspars*. — Journ. Geol., vol. 57, 592-599.
- KULP, P. L. 1951. *Origin of the Hydrosphere*. — Bull. Geol. Soc. America, vol. 62, n° 3, 326-329.
- LACROIX, A. 1898-99. *Le Granite des Pyrénées et ses phénomènes de contact : Première Mémoire*. — Bull. Ser. Carte Géol. France, n° 64, vol. 10.
- 1899-1900. *Deuxième Mémoire*, Ibid., n° 71, vol. 11.
- LANDES, K. K. 1952. *Our shrinking globe*. — Geol. Soc. America Bull., vol. 63, n° 3, 225-240.
- LAPADU-HARGUES, P. 1945. *Sur l'existence et la nature de l'apport chimique dans certaines séries cristallogéniques*. — Bull. Soc. Géol. France, vol. 15, 5^a sér., 255-310.
- LARSSON, W. 1940. *Petrology of interglacial volcanics from the Andes of northern Patagonia*. — Bull. Geol. Inst. Upsala, vol. 28, 191-405.
- LEES, G. M. 1952. *Foreland folding*. — Quart. Jour. Geol. Soc., London., vol. 108, 1-34.
- LOEWINSON-LESSING. 1911. Geol. Mag., 248-257 (citado por Read, 1944).
- LYELL, C. 1838. *Elements of Geology*. Primera edición.
- MAYO, E. B. 1937. *Sierra Nevada pluton and crustal movement*. — Geol. Soc. America Bull., vol. 52, 1355-1418.
- MICHEL-LÉVY, A. 1893-94. *Contribution à l'étude du granite de Flamanville et des granites français en général*. — Bull. Carte Géol. Fr., vol. 5.
- NIGGLI, P. 1942. *Das Problem der Granitbildung*. — Schweizer Min. Pet. Mitt., vol. 22, 1-84.
- 1947. *Die Systematik der Gesteine und Minerallagerstätten*. — Bull. Com. Géol. Finland., 140, 141-158.
- PALIUC, G. 1932. *Untersuchungen der Plagioklase einiger tertiärer Ergussgesteine Siebenbürgens (Rumänien) mittelst der Universaldrehtischmethode*. — Schweiz. Min. Petr. Mitt., vol. 12, 423-444.
- PERRIN, R. y ROUBAULT, M. 1937. *Les réactions à l'état solide et la géologie*. — Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, ser. 5, n° 1.
- 1939. *Le granite et les réactions à l'état solide*. — Serv. carte Géol. Algérie, Bull. 4, 5^a sér., Petrographie.
- 1949. *On the granite problem*. — Journ. Geol., vol. 57, n° 4, 357-379.
- 1951. *Réflexions et discussions a la suite des récents travaux sur les feldspaths*. — Bull. Soc. Géol. Fr., 6^a série, 1, 105-117.
- RAMBERG, H. 1944. *The thermodynamics of the earth's crust. I : Preliminary survey of*

- the principal forces and reactions in the earth's crust.* — Norsk. Geol. Tidsk., Bd. 24, 98-111.
- RAGUIN, E. 1946. *Géologie du granite.* — Paris. Masson & Cie.
- READ, H. H. 1943. *Meditations on granite I.* — Geol. Assoc. London Proc., vol. 54, 45-85.
- 1944. *Meditations on granite II.* — *Ib.*, vol. 55, 45-93.
- 1948. *Granites and granites.* — Memoir 28, Geol. Soc. America, 1-19.
- REYNOLDS, D. L. 1943. *Granitization of hornfelsed sediments in the Newry granodiorite of Goragwood Quarry, Co. Armagh.* — Royal Irish Acad. Pr., vol. 48 B, 231.
- 1944. *The south-western end of the Newry igneous complex.* — Quart. Jour. Geol. Soc. London, vol. 99, 205-246.
- 1946. *The sequence of geochemical changes leading to granitization, ib.*, vol. 102, 389-446.
- REYNOLDS, D. L. 1947. *The association of basic «fronts» with granitization.* — Sci. Prog., vol. 35, 205-219.
- 1952. *The difference in optics between volcanic and plutonic plagioclases, and its bearing on the granite problem.* — Geol. Mag., vol. 89, n° 4, 233-250.
- RITTMAN, A. 1938. *Ueber die Herkunft der vulkanischen Energie und die Entstehung des Sials.* — Geol. Rundschau, Bd. 30, H. 1-2, 52-60, D., 29.
- ROSENBUSCH, H. 1877. *Die Steiger Schiefer und ihre Contactbildungen an den Graniten von Barr-Andlau und Hohwald.* Strassburg.
- RUBEY, W. W. 1951. *Geologic History of Sea Water.* — Bull. Geol. Soc. America, vol. 62, n° 9, 1111-1148.
- SAINTE-CLAIRE DEVILLE, C. 1841. — C. R. Acad. Sc., vol. 52, 1264 (citado por Read, 1944).
- SAN MIGUEL ARRIBAS, A. 1951. *Ideas modernas sobre la petrogénesis de las rocas eruptivo-metamórficas y volcánicas.* — Notas y Comunicaciones Inst. Geol. Min. España, n° 22, 1-84.
- SCOTT, R. H. 1862. *On the granitic rocks of the south-west of Donegal and the minerals therewith associated.* — Jour. Geol. Soc. Dubl., vol. 9, 285-294.
- SEDERHOLM, J. J. 1907. *Om Granit och Gneiss.* — Bull. Comm. Géol. Finlande, n° 23.
- 1923. *On migmatites and associated pre-cambrian rocks of south-eastern Finland.* *Ib.*, n° 58.
- 1926. — *Ib.*, n° 77.
- 1934. — *Ib.*, n° 107.
- SHAND, S. J. 1948. *The origin of Granite (Discussion).* — Geol. Soc. America, Memoir 28, 137-139.
- SLICHTER, L. B. 1950. *The Rancho Santa Fe conference concerning the evolution of the earth.* — Proc. Nat. Acad. Sc., vol. 36, n° 9, 511-514.
- TERMIER, P. 1903. *Les schistes cristallins des Alpes occidentales.* — C. R. IX Congrès Géol. Internat., Vienna (1904).
- 1910. *Sur la genèse des terrains cristallophylliens.* — C. R. XI, Congrès Géol. Internat., Stockholm (1912).
- TUTTLE, O. F. y BOWEN, N. L. 1950. *The system Na Al Si₃O₈-K Al S₂O₈-H₂O.* — Jour. Geol., vol. 58, 489-511.
- TUTTLE, O. F. 1952. *Origin of the contrasting mineralogy of extrusive and plutonic salic rocks.* — Jour. Geol., vol. 60, n° 2, 107-124.
- VIRLET D'AUGST, T. 1844. *Notes sur les roches d'imbibition.* — Bull. Soc. Géol. Fr., vol. 1, 2^a série, 825-852.

- VIRLET D'AOUST, T. 1847. *Observations sur le métamorphisme normal et la probabilité de la nonexistence de véritables roches primitives a la surface du globe.* — Bull. Soc. Géol. Fr., vol. 4, 2ª serie, 498-505.
- WAGER, L. R. y DEER, W. A. 1939. *The petrology of the Skaergaard intrusion, Kangerdlugussuaq, East Greenland.* — Medd. Grönland, vol. 105, n° 4.
- WALKER, F. y MATHIAS, M. 1946. *The petrology of two granite-slate contacts at Capetown, South Africa.* — Quart. Jour. Geol. Soc. London, vol. 102, n° 4, 499-518.
- WARD, C. 1875-76. *On the granitic, granitoid and associated metamorphic rocks of the Lake-District.* Quart. Jour. Geol. Soc., vol. 22, 1-32.
- WEGMANN, C. E. 1935. *Zur Deutung der Migmatite.* — Geol. Rund., vol. 26, n° 5, 305-350.
- 1936. *Geologische Merkmale der Unterkruste.* — Ibid., vol. 27, 43.
- 1938. *Geological investigations in Southern Greenland.* — Part. I, Medd. om Grönland, Bd, 113, n° 2, 98-121.
- WEGMANN, C. E. y KRANCK, E. H. 1931. *Beiträge sur Kenntnis der Svecofenniden in Finland, I, II.* — Bull. Comm. Géol. Finlande, n° 89, 1-107.
- WEIZSÄCKER, C. F. 1944. *Ueber die Entstehung des Planetensystems.* — Zeitschr. für Astrophysik, vol. 22, 1.
- WENK, E. 1933. *Statistische Drehtischuntersuchungen an Plagioklasen rumänischer Ergussgesteine.* — Schweiz Min. Petr. Mitt., vol. 13, 205-219.
- ZIRKEL. 1876. *Microscopical petrography.* — U. S. Geol. Explor. Fortieth Parallel, VIII, 259-269.