

EL VALOR DE LOS EXPERIMENTOS EN GEOLOGIA ¹

Ph. H. KUENEN ²

Traducción por JORGE A. BRIEVA *

INTRODUCCION

Desde los días del nacimiento de la geología se han llevado a cabo multitud de experimentos; sin embargo el número de geólogos que se han ocupado de más de una investigación experimental, es muy reducido; menor aún es el número de los que han efectuado un programa sostenido de este tipo; entre los pocos geólogos que han desarrollado sistemáticamente una ancha gama de procedimientos experimentales se encuentra Sir James Hall (\pm 1810)., y posteriormente Daubrès (\pm 1870) y Meunier (\pm 1890). Por regla general, la geología no ha empleado la experimentación; una importante excepción la constituye la petrología de las rocas ígneas y metamórficas; en su desarrollo han contribuido no solo los trabajos de campo y de microscopía, sino la química experimental de los sistemas de silicatos.

Los geólogos han hecho uso de los resultados experimentales de otras ramas del conocimiento, tales como las propiedades ópticas de los minerales, el flujo de líquidos en canales y a través de medios porosos, la propagación de vibraciones a través del globo terrestre, las reacciones químicas en el estudio de la diagénesis y la meteorización; han usado, igualmente, los resultados de las pruebas efectuadas por la Ingeniería en lo referente al transporte de sedimentos, problemas de estabilidad de los suelos, propiedades mecánicas de las rocas, etc.; en la actualidad, casi todas estas materias pertenecen al dominio de la cristalografía, la geofísica, la geoquímica, la hidrología, y los estudios

¹ Conferencia dictada en el Kon. Ned. Geol. Mijnb. Genootschap, el 30 de octubre de 1964.

² Geological Institute, Groningen, Netherlands.

* Departamento de Geología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

de suelos, todas las cuales, especialmente las tres primeras, son, en gran parte, ramas del conocimiento basadas en la experimentación; esto deja a la geología, en el más estricto sentido de la palabra, con una herencia muy pobre en cuanto a los resultados obtenidos por medio de experimentos. Se podría afirmar sin caer en la exageración, que aquellos campos de la geología que han sido investigados en forma más completa, lo han sido por investigadores dedicados al estudio de ciencias afines, y no por los geólogos.

El autor se considera como una excepción entre los geólogos, por cuanto tiene una gran confianza en la ayuda que presta la experimentación a la solución de los problemas geológicos. Sin embargo, hay que recordar que tampoco carecen completamente de razón aquellos que no le han dado mucho crédito a la geología experimental. Si se analizan los experimentos llevados a cabo hasta el momento, se observa que la gran mayoría son de baja calidad y lo que es más, pueden conducir a conclusiones erradas; más adelante se darán algunos ejemplos. El experimentador podría argumentar, a su turno, que muchas de las conclusiones a las que han llegado los geólogos de campo, han resultado ser más tarde inadecuadas o completamente erróneas. Después de todo, estos contratiempos no son sino una medida del progreso de la ciencia y de la gran distancia que separa nuestros conocimientos actuales, de la solución completa de todos los problemas. Hay que admitir, sin embargo, que la geología experimental es particularmente rica en *lastre* inútil.

Sería conveniente, antes de continuar, examinar el significado de la acepción "experimento geológico". No es fácil encontrar la definición apropiada para cada uno de estos dos términos; el diccionario de *Nuttall*, publicado en 1890, define "experimento" como "un acto u operación diseñado para descubrir alguna verdad, principio o efecto desconocidos; o para establecer ésta o éstos una vez descubiertos, principalmente por medio de la variación, a voluntad nuestra, de la combinación de elementos y circunstancias y la observación posterior del resultado".

La variación, aunque de uso común, no es necesaria porque una sola prueba puede ser suficiente para resolver el problema que se está investigando. El elemento de diseño debe ser tomado en un sentido amplio ya que un experimento puede ofrecer soluciones a un problema muy diferente de aquel que se trataba de resolver; por ejemplo, el autor ha estado investigando la estructura interna de los deslizamientos subacuáticos producidos en el laboratorio; en uno de los ensayos se formaron, por casualidad, volcanes de arena en la superficie; tan

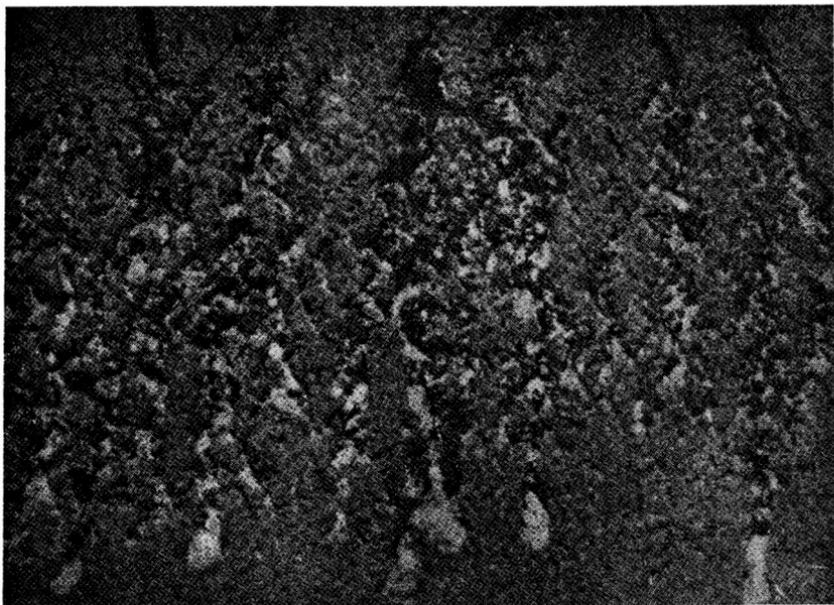


Fig. 1.—Estructura, que semeja cavidades, debida a convección de asentamiento. Suspensión de arena con algunos granos oscuros y arcilla, cerca de $2\times$. Duración de la convección, cerca de un cuarto de hora.



Fig. 2.—Estructura debida a convección de asentamiento. Semeja estructuras magmáticas. La convección se debe ver en acción para poder apreciar lo vigorosa que puede ser la conmoción.

Fig. 3.—Grietas de contracción de disposición hexagonal, formadas bajo el agua. El fósforo que flota sobre el agua es de unos 4,5 cm. de largo.



Fig 4.—Montecillos de topo formados por compactación subacuosa. A la derecha algunas grietas de contracción. Está involucrada la convección de asentamiento. El mismo experimento de la Fig. 3.

casual fue esto, que su significado geológico no fue apreciado por el autor sino hasta cuando Gill le expuso algunos ejemplos en sedimentos carbonáceos (Gill y Kuenen, 1958); sin embargo, no se puede negar que éste fue un experimento geológico.

En otra ocasión, el autor ensayaba la viscosidad de las suspensiones de arcilla por medio de la medición de la velocidad de deposición de la arena que pasaba a través de dichas suspensiones. Observó que dentro de un límite de variación bastante pequeño de densidades, existía la tendencia a producirse una convección espontánea de la suspensión arena-arcilla. Bajo condiciones favorables, una "convección de asentamiento", muy activa, continuará durante una hora en un recipiente que contiene únicamente un litro de suspensión. Nubes o concentraciones de arena se abren paso hacia abajo, mientras otras partes de la suspensión con menos arena se escapan hacia arriba; el resultado final es una concentración de arena en la parte inferior y de arcilla en la parte superior, con estructuras complicadas en las partes intermedias (Fig. 1)³; probablemente, tales suspensiones se forman muy rara vez en la naturaleza, de tal manera que el experimento tiene poco valor desde el punto de vista geológico; sin embargo, observando el fascinante proceso, uno se siente inclinado a asumir que éste ilustra una convección *de deposición*, análoga a la de una cámara de magma básico que se está enfriando; bien podría ser ésta la causa de la estructura laminar de algunos gabros (Fig. 2). El experimento, por lo tanto, ilustra posiblemente un tipo especial de cristalización fraccionada.

En otra oportunidad se colocó un poco de arcilla en un tanque y se permitió que ésta se depositara; el depósito resultante iba a ser usado como base para una lámina de arena en un experimento para estudiar los calcos de carga. Durante la noche se desarrolló bajo el agua un sistema hexagonal de fracturas de contracción; esto demuestra que las estructuras similares que se encuentran en los sedimentos arcillosos no indican necesariamente desecación (Fig. 3) (Kuenen, 1963). En este caso, al igual que en el anterior, y antes de iniciar el desarrollo del ensayo que se intentaba, se observó en lo que obviamente era un experimento, un fenómeno con significado geológico.

³ Las suspensiones de arcilla en el agua del mar, con concentraciones de unos pocos gramos por litro o más, tienden a asentarse con un límite preciso entre la suspensión y el agua clara de arriba. Entre los fenómenos interesantes que se pueden observar, está una convección de asentamiento en pequeña escala. En las suspensiones más diluidas (bajo 10 gr. por litro) la convección puede consistir en una corriente hacia arriba y otra hacia abajo.

White (1961) ya había llamado la atención acerca de la contracción bajo el agua (sinaeresis), pero en sus experimentos no obtuvo la forma hexagonal, y además, tuvo que recurrir a una disminución en la salinidad para producir el fenómeno de contracción. Dangeard y otros (1964) lograron obtener la misma clase de fracturas sin arreglo determinado y sin necesidad de recurrir a cambios de salinidad.

En el mismo experimento se formaron curiosos *montecillos de topo* de un centímetro de diámetro, con un espaciamiento pequeño sobre una parte del fondo (Fig. 4). Aparentemente, dichos *montecillos de topo* son la expresión superficial del agua expelida, y fácilmente se podrían confundir con formas orgánicas.

Obviamente, debe haber algún elemento artificial involucrado en un experimento; de otra manera, se estaría observando únicamente la naturaleza. La medida del crecimiento de un delta no es un experimento, si la desembocadura de la corriente no ha sido dirigida por intervención humana a una nueva posición; teóricamente, para que esto constituya un experimento, el cambio deberá ser hecho por un geólogo, con el propósito de efectuar estudios fluviales. Pero si los ingenieros fueran los responsables y nunca hubieran planeado observar el crecimiento de un nuevo delta, el geólogo por lo menos debería tratar el asunto como si fuera un experimento. De la misma manera, el estudio de la saltación de los granos de arena en una duna se podría llevar a cabo con la ayuda de un equipo electrónico complicado; esto no sería un experimento, ya que no se ha interferido el proceso natural. Por otra parte, la misma observación hecha en un túnel de viento, o el uso de granos coloreados en la naturaleza sí constituirían un experimento. La definición del diccionario dada arriba, podría ser interpretada también en forma tal que cubriera todas las clases de medidas hechas sobre muestras, o en el campo. Para evitar toda ambigüedad, la palabra *general* debería ser agregada a *verdad*, *principio* o *efecto*, porque es importante distinguir entre la aplicación de técnicas conocidas, lo cual no es un experimento, y la investigación de una propiedad desconocida, lo cual puede hacerse por medio de un experimento. La determinación de los minerales en una sección delgada no es un experimento, pero la obtención de las propiedades ópticas de los minerales es parte de la experimentación mineralógica. La dureza de un mineral nuevo puede ser determinada experimentalmente; pero probar la dureza de un cristal desconocido para descubrir la clase de mineral constituye únicamente un medio de identificación. La medida de las velocidades sísmicas por medio del uso de explosiones no es un procedimiento experimental, si el sismólogo está estudiando la estructura de la corteza terrestre en un punto dado: está dedicado a

un trabajo regional haciendo uso de las propiedades ya conocidas de las rocas; pero si lo que busca es encontrar la velocidad en una cierta clase de roca bajo ciertas condiciones, entonces está llevando a cabo un experimento.

El desarrollo, por ensayos, de una nueva técnica, como la prueba del fondo del mar para el flujo de calor, contiene un poderoso elemento de experimentación, solamente desde el punto de vista de la ingeniería. Pero lógicamente, el uso de la prueba es una medida y no un experimento.

Al evaluar un experimento geológico, uno de los problemas más difíciles consiste en determinar el límite exacto entre la geología y otras ciencias relacionadas con el estudio de la tierra como la geofísica y la geoquímica. Entre los problemas dominantes de la geología está el del origen y naturaleza de los continentes como estructuras opuestas a las cuencas oceánicas, y hay que recurrir a la geofísica para gran parte de la información fundamental; las formas ultrametamórficas no son menos importantes, y en esta área los geólogos deben depender en gran parte de la geoquímica. Estas ciencias afines se basan principalmente en resultados obtenidos a través de la experimentación y se podría argüir que dichos resultados forman parte de la geología experimental. Aunque las ciencias de la tierra están estrechamente relacionadas entre sí, el mismo elemento que las liga proporciona un límite artificial que asigna campos determinados a cada una de estas ciencias; aunque la geofísica y la geoquímica se basan en gran parte en la experimentación, no se puede tomar esto como base cuando se está defendiendo la aplicación de los experimentos en geología; por tanto, la atención estará dirigida a la geología *sensu strictu*.

Como dijo Daubrée hace casi un siglo, nuestro ambiente natural es prácticamente un laboratorio para el geólogo. La observación cuidadosa de los procesos que operan en la superficie de la tierra puede reemplazar en su función a los experimentos cuando se trata de resolver problemas de paleogeografía y formación de rocas; una morrena de fondo es, por decirlo así, una tilita experimental; una duna de arena es un depósito eólico experimental; una arena de mar profundo es una grauvaca tipo "flysh" experimental; un depósito de pantano es un banco de carbón experimental; un mar somero es una facies nerítica experimental.

¿Para qué llevar a cabo experimentos si todos los procesos importantes que actúan en la naturaleza están listos para ser examinados?

Sin embargo, en el laboratorio de la naturaleza, los experimentos llevados a cabo son generalmente tan complicados que es imposible analizarlos; basta con recordar problemas como la meteorización de

las rocas, la producción del petróleo a partir de restos orgánicos, el transporte de sedimentos desde su punto de origen hasta el mar; cuando más, estos experimentos naturales muestran claramente el producto final, pero muy difícilmente la parte con que cada factor contribuye a la obtención de este producto. Puede ocurrir también que el fenómeno ocurra en lugares inaccesibles en donde no es posible hacer observaciones (migmatización, formación del clivaje). En otros casos, el tiempo necesario para poder observar un cambio es muy largo (crecimiento de un atolón o de un nódulo de manganeso), o el proceso no se puede predecir (deslizamientos subacuáticos, avalanchas de nieve, paroxismos volcánicos, caída de tectitas) y por lo tanto no hay testigos del acontecimiento. En tales casos la demostración es de poco valor para los geólogos; esta es la razón por la cual el laboratorio de la naturaleza no satisface todos nuestros deseos.

La ventaja de un geólogo de campo que estudia un proceso natural, sobre un experimentador, es la de que aquél está seguro de que no está observando algo fuera de escala, o materiales con propiedades erróneas o un orden incompleto; pero el geólogo experimental puede escoger sus condiciones, variar un factor, simplificar generalmente el diseño o aligerar el proceso en tal forma que el análisis sea posible; por lo general, sus oportunidades de observación serán más favorables.

El geólogo debe trabajar con muchos procesos y condiciones que no pueden ser observados directamente; el metamorfismo, la extensión y retiro de los glaciares en el pleistoceno, las transgresiones y regresiones, la intrusión magmática, la formación de plegamientos y fallas de empuje, la migración de animales o de petróleo, la meteorización y la diagénesis, la paleogeografía y muchos otros aspectos que forman parte del pensamiento geológico, no pueden ser observados directamente. El geólogo debe recurrir, entonces, a la proyección mental de una película que ignora la cubierta de las rocas, condensa el factor del tiempo, extrapola a partir de dimensiones familiares, y anima los movimientos representados por las estructuras que se encuentran en las rocas; en realidad, en su mente está llevando a cabo un experimento para probar si el proceso imaginado lo conduce al resultado conocido. Lo que él imagina, sin embargo, es una drástica simplificación del proceso natural; cuando critica al geólogo experimental, debido a las limitaciones de sus pruebas en el laboratorio, no debiera olvidarse de que sus propios métodos son, en algunos aspectos, aún más primitivos; ambos, el geólogo de campo y el experimentador, deben partir de algo asumido. Sin embargo, el experimentador tiene la ventaja de que puede permitir que los eventos sigan su curso natural,

mientras que el colega opuesto a la experimentación, al llevar a cabo su prueba mental, puede estar completamente equivocado en la deducción hecha acerca del desarrollo de estos mismos eventos; puede estar acomodando las leyes de la naturaleza en tal forma que le produzcan el resultado conocido mientras afirma que se está basando exclusivamente en hechos.

TIPOS DE EXPERIMENTOS GEOLOGICOS

Los experimentos geológicos pueden ser llevados a cabo bajo dos clases diferentes de condiciones: en el campo y en el laboratorio.

Experimentos de campo.

En el caso de trabajos llevados a cabo en el campo no puede haber un límite exacto entre la observación de un proceso natural y la aplicación de una técnica experimental; el marcar partículas naturales *in situ*, como cantos rodados o granos, para observar sus movimientos, puede ser o no considerado como un experimento, pero la introducción de material foráneo dentro de un sistema natural para observar su comportamiento constituye ciertamente la aplicación de un método experimental. La creación de oportunidades de observación, si no interfieren con el fenómeno estudiado, no debe ser considerada como experimentación; sin embargo, cualquier interferencia con el proceso mismo, tal como la regulación del flujo de obstrucción del transporte, introduce un elemento de experimentación. Muchos proyectos de ingeniería civil dan como resultado experimentos a gran escala, desde el punto de vista del geólogo; la formación de lagos, la construcción de deltas, la interferencia con el transporte a lo largo de la costa, la limpieza de canales, los arrastres del suelo y los deslizamientos, se cuentan entre los *experimentos* llevados a cabo gratuitamente para la profesión de geología. La medición de la velocidad de las corrientes de turbidez submarinas, por medio de la rotura de cables submarinos, muy difícilmente puede considerarse como experimentación en el campo, ya que la interferencia con el proceso es insignificante; antes de usar el término *experimento*, es mejor esperar a la formación de una corriente de turbidez inducida por el uso de explosivos.

Experimentos de laboratorio.

Los experimentos de laboratorio abarcan todos los principales capítulos de la geología; sin embargo, la única materia de la geología general que muchos investigadores han tratado de esclarecer por medio de técnicas experimentales es la de la geología estructural. Las propiedades mecánicas de las muestras de rocas, la mecánica de su deformación, la producción de pliegues y fallas, la generación de orógenos y la formación y distribución de las cadenas orogénicas en la superficie de la tierra han sido el objeto de la investigación de varios experimentadores. En el curso de siglo y medio han aparecido en

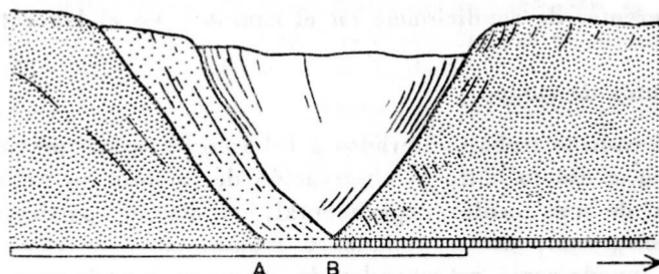


Fig. 5.—Diagrama de un experimento de graben por Cloos. Las partes protegidas de la deformación por el substrato rígido están punteadas (dos etapas).

total algunos 200 artículos sobre estos temas; sin embargo, su impacto en el cuerpo general del pensamiento no ha sido grande; las principales razones pueden ser las de que los problemas atacados fueron usualmente muy complicados y de que no fue usada la verdadera escala en tamaño, velocidad y propiedades de los materiales.

Aun en lo que se refiere a los resultados aparentemente tan exitosos de Bailey Willis, Hubbert nos previene al considerar un inconveniente fundamental: el sobrepeso del disparo principal representa una profundidad de 200 kilómetros bajo tierra.

Los laudables resultados obtenidos por Cloos en sus limitaciones de un graben, han sido generalmente aceptados como verdaderas réplicas de los desarrollos estructurales; esto es debido en parte a sus materiales mejorados y a los factores de escala, en comparación con los primeros experimentos tectónicos. Sin embargo, el substrato usado por Cloos en sus primeros experimentos consistía de dos hojas de metal delgadas y rígidas, parcialmente superpuestas; éstas ejercían fuerzas horizontales sobre el modelo de una manera muy poco real, y no tenían en cuenta ajustes verticales; la dilatación empezaba con

dos fallas opuestas que se cortaban oblicuamente hacia arriba, desde una línea en el borde de la lámina superior, esto es, desde la base de la corteza en el modelo. Los bloques de arcilla fuera de estas fallas no sufrían deformación ulterior; pero el prisma interior se hundía asimétricamente sobre las partes de la lámina metálica inferior que iban siendo expuestas, a medida que esta lámina era puesta al descubierto por el movimiento (Fig. 5).

La disposición del experimento forzaba a todo el movimiento a concentrarse en un punto, y la única tectónica que podría resultar sería la de un graben en forma de cuña, suponiendo que tuvo lugar el fallamiento; por consiguiente, el experimento era una ilustración legítima e instructiva de las fallas, pero era muy poco significativa en lo que se refería a la comprensión de las estructuras de graben. Los experimentos en los cuales las dos hojas se tocaban primero y luego se separaban, exponiendo más y más el piso, eran tan artificiales como simétricos; se puede añadir que, especialmente en un graben el cual presuntamente corta a través de la corteza rígida dentro del substrato móvil, el papel de la isostacia puede ser fundamental, y su exclusión de los experimentos oscurece lo que puede ser el hecho principal en la naturaleza.

Si una corteza se encuentra en un estado de esfuerzo tensional y no está soportada por placas rígidas, se puede suponer que se desarrollan unas pocas fallas paralelas, todas con su pendiente en la misma dirección, o una falla con varias fallas menores en dirección opuesta. Cloos no incluyó estas posibilidades a causa de la técnica usada, y por consiguiente estos experimentos acerca de las estructuras de graben son controvertibles.

En posteriores experimentos Cloos mejoró su técnica al introducir dilatación y abombamiento del soporte hacia arriba. Esto depende de las relaciones postuladas para la corteza más profunda, y de lo fuerte que se presume sea la curvatura del domo, si se juzga apropiado este tipo de experimento.

En el caso de la tectónica gravitatoria de Buckner, con un modelo de cera, la mayor dificultad está en aceptar que las rocas en la naturaleza pueden reaccionar con la misma clase de flujo que la cera; este problema está estrechamente ligado con el interrogante del momento en que tiene lugar la diagénesis en sedimentos geosinclinales: antes, en el momento o después de la deformación.

El valor de los experimentos en los cuales la idea consiste en la forma de cadenas enteras de montañas o su modelo sobre la superficie del globo, es muy pequeño; nuestro conocimiento de las propie-

dades mecánicas de la corteza y de las fuerzas que actúan sobre ella es inadecuado como para permitir un planteamiento cuidadoso de tales experimentos. Usar papel corrugado y humedecido, pegado a una mesa con goma blanda, y presionarlo con un dedo en la parte superior, o desinflar un globo revestido con arcilla son la clase de investigaciones que llevan descrédito a la geología experimental.

La breve reseña anterior indica que muchos geólogos estructurales han sido tentados a seguir el método experimental, pero esta materia ha resultado ser parcialmente complicada; aún se puede esperar que los experimentos jueguen una parte importante en la labor de descifrar la tectónica, pero solamente si los resultados se analizan más cuidadosamente y los problemas más simples se acometen primero, y suponiendo que se puedan encontrar los materiales convenientes.

Además de los experimentos de tipo estructural, se han llevado a cabo otros relacionados con geología endogénica, especialmente sobre volcanismo (formas de conos, intrusiones, formación de calderas, fusión y consolidación de las rocas); se han hecho pruebas sobre el desarrollo de pliegues tigmóticos y *boudinage*, temas que están relacionados con tectónica, fenómenos intrusivos y metamorfismo.

El campo más promisorio para la geología experimental está en los procesos externos; el transporte por hielo, agua y viento puede ser sometido a experimentación, tanto cualitativa como cuantitativa; se pueden estudiar los mecanismos y las relaciones de tamaño, incluyendo el tiempo; se pueden determinar factores tan importantes como la influencia sobre la forma y selección de las partículas durante el transporte; son susceptibles de tratamiento experimental las formas deposicionales, tales como laminación, marcas de oleaje, relleno de canales, deltas, dunas, barras y su relación con el material disponible o con la fuerza de las corrientes y tamaño de las olas, y la acción recíproca de olas y corrientes; en todas estas materias se necesita urgentemente una cooperación mucho más estrecha que en el pasado con los laboratorios de ingeniería.

Deslizamientos, calcos de carga, flujos de lodo y corrientes de turbidez (incluyendo nubes ardientes y avalanchas secas) ofrecen un extenso campo para la aproximación experimental; lo mismo ocurre con la compactación, solución, meteorización, congelación y actividades de plantas y animales que perturban un sedimento no consolidado.

Una estructura experimental de deslizamiento se muestra en la figura 6. Se puede notar que las distorsiones son casi tan intensas en una como en otra dirección; esta es una característica de la mayoría de las estructuras de deslizamiento en la naturaleza, debida

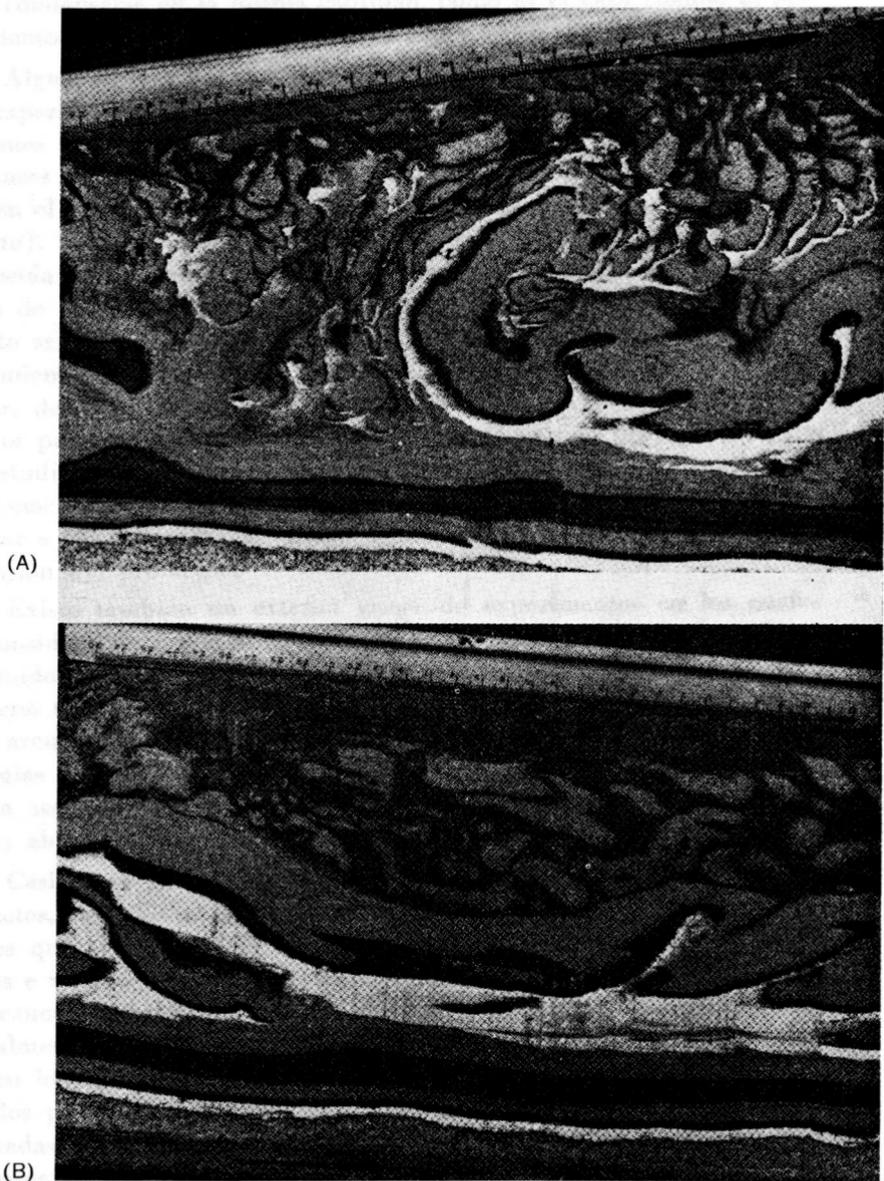


Fig. 6. — Estructuras experimentales de desmoronamiento en cortes paralelo (A) y normal (B) a la pendiente.

parcialmente a la incompetencia de las capas, ya que las zonas vecinas no se arrastran unas a otras para elaborar formas similares; también se debe a que las secciones vecinas paralelas a la pendiente no tienen que condensarse en la misma cantidad, como es el caso cuando el plegamiento es debido a una fuerza de compresión externa.

Algunos de estos problemas pueden ser determinados por medio de experimentos llevados a cabo bajo un método ajustado a las condiciones naturales y con las dimensiones naturales; el resultado es entonces aplicable directamente a problemas geológicos (ejemplo: grietas en el lodo, huellas de animales, transporte en canales y túneles de viento). En otros la escala de las dimensiones o del tiempo debe ser reducida (ejemplo: abrasión en un túnel de viento de ventifactos hechos de material blando para reducir la escala del tiempo). En este punto se deben considerar las leyes de los modelos a escala (un procedimiento arriesgado para la mayoría de los geólogos, incluyendo al autor, debido a la falta de habilidad matemática); sin embargo, la mayor parte de los experimentos geológicos han sido proyectados para el estudio de problemas en los cuales entran factores y propiedades desconocidos, y en tales casos los razonamientos simples deben reemplazar a los matemáticos, hasta que se haya obtenido una mejor comprensión del problema.

Existe también un extenso grupo de experimentos en los cuales se considera un único aspecto de un proceso complicado; el resultado obtenido puede ser útil al analizar el problema geológico, pero no se obtiene una respuesta total y directa (ejemplos: formación de deltas por arena únicamente, sin considerar el crecimiento de la vegetación, las olas o las mareas; arqueamiento hacia abajo de una corteza flotante sometida a compresión horizontal; evaporación del agua del mar; abrasión de guijarros con meteorización o solución).

Casi todos los experimentos de laboratorio muestran uno o más aspectos, extraños al proceso natural estudiado; los canales tienen paredes que son rectas, lisas y verticales en vez de ser irregulares, rugosas e inclinadas; más aún, los canales son mucho más estrechos que los cauces naturales de las corrientes; aunque un canal se comporta usualmente como una sección longitudinal de un río, las paredes impiden los movimientos transversales. En los tanques de olas comunes usados para los experimentos de playas, las pendientes son muy escarpadas; más aún, las olas del modelo no son del verdadero tipo de superficie y en la mayoría de los tanques éstas se aproximan en línea recta a la playa, en lugar de hacerlo oblicuamente, como sucede a menudo.

El primer requisito es el de que el experimentador perciba los defectos de su técnica, antes de que aplique sus resultados a problemas geológicos. Como ya se hizo notar, el autor trató alguna vez de hallar la viscosidad de corrientes de turbidez observando la velocidad de asentamiento de granos de arena en suspensiones de arcilla de varias densidades (Kuenen, 1951); no se comprendió la importante influencia del flujo turbulento en un medio tixotrópico; por consiguiente, se hallaron valores muy altos en suspensiones estancadas. Posteriormente se pudo demostrar que las primeras medidas de velocidad de las corrientes experimentales (Kuenen, 1950) demostraron que la viscosidad en una suspensión de arcilla turbulenta de alta densidad está muy cerca a la del agua clara; las pruebas de las velocidades de asentamiento no estaban obviamente bien encaminadas; de otra parte, como se señaló anteriormente, se descubrieron los procesos desconocidos (para los geólogos) de convección de asentamiento.

FUNCION DE LOS EXPERIMENTOS EN GEOLOGIA

La función de la geología experimental no se puede establecer de una manera simple, ya que varía extensamente con el problema acometido. Se hizo notar arriba que muchos experimentos no son otra cosa que una ilustración de una hipótesis sin el poder de confirmarla, y mucho menos de probarla; son buenos ejemplos de esto las réplicas de conos volcánicos contruídos soplando arena desde un respiradero modelo, o un modelo de geyser de Bunsen. En esta categoría caen cierto número de experimentos que son engañosos a causa de que parecen confirmar hipótesis erróneas; Meunier produjo explosiones de bolas de arcilla húmeda colocadas en un horno caliente, y pretendió que esto confirmaba sus ideas acerca del origen de los terremotos por la caída de masas húmedas de rocas dentro de fisuras profundas de la corteza (Fig. 7); más aún, consiguió que la vibración registrara cierta clase de sismogramas por medio de un peso puntiagudo suspendido de un cordel con la punta sobre una capa de arena colocada sobre el extenso piso del horno; con encantadora ingenuidad Meunier describió entusiasmado la estrecha semejanza que había entre sus sismogramas arenosos y los sismogramas, como una prueba de su hipótesis.

De acuerdo a Oulianoff (1961, b), las marcas de oleaje sobre el piso del fondo del mar difícilmente pueden atribuirse a corrientes o a ondas acuáticas; el mismo autor aseguraba que las ondas sísmicas y microsísmicas eran las responsables; para fortalecer su teoría él pro-

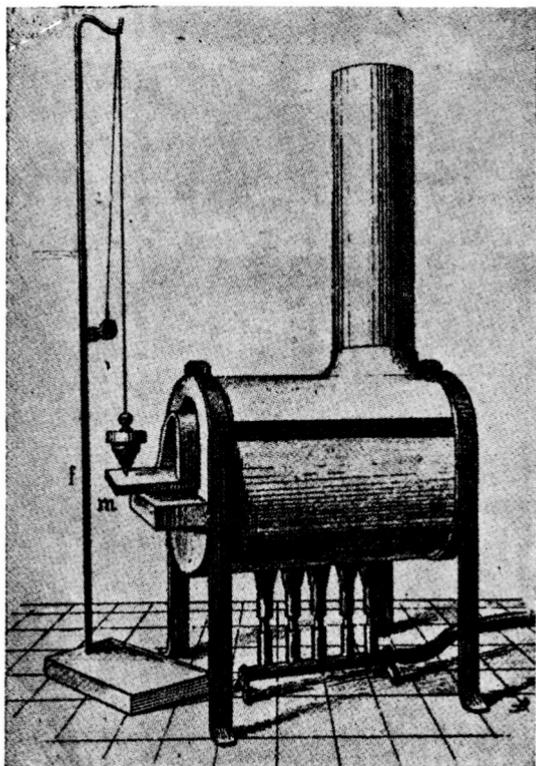


Fig. 7.—Instrumento usado por Meunier (1899) para mostrar cómo se producen sismogramas, por explosiones de bloques húmedos que caen dentro de aberturas en la corteza.

dujo marcas de oleaje en un tanque por medio de vibraciones artificiales. Sin embargo, la actividad sísmica no es menos intensa en aguas someras que en profundas y deberá causar rizaduras tan eficientemente en las profundidades neríticas como en las abisales.

Si se considera primero el caso de los microsismos, se debe tener en cuenta que dichos microsismos están llegando sin interrupción a cualquier punto desde todas direcciones; tal causa multidireccional no puede producir una estructura orientada como la del oleaje; la omnipresencia de ligeros temblores debería causar un oleaje universal en todos los fondos arenosos, incluyendo los de lodazales y acuarios; el valor de entrada de la energía requerida para poner los granos de sedimento en movimiento, evidentemente no es alcanzado por los microsismos.

Las bellas fotografías que Oulianoff publicó de sus marcas de oleaje experimentales (1961, b) parecen a primera vista ser un argumento fuerte al posible origen sísmico de algunas ondulaciones; pero las únicas vibraciones que dieron rizaduras claras fueron las aplicadas horizontalmente en una dirección, y esto anula la comparación con los microsismos.

Parece que la hipótesis de Oulianoff debe ser restringida a temblores violentos cercanos a los epicentros; tales macrosismos están orientados y son raros en cualquier punto específico sobre el piso del océano, de manera que las marcas de oleaje unidireccionales tendrían alguna oportunidad de conservarse. Pero antes de que uno pudiera aceptar este punto de vista se debería demostrar que los terremotos cercanos verdaderamente han producido rizaduras; para que la confirmación experimental sea convincente se tendría que demostrar a su vez que la aceleración del piso del tanque a causa del vibrador, y el número de vibraciones necesarias, no excederían los valores moderados medidos en la naturaleza.

Olausson y Uusitalo (1963) afirmaron recientemente que los nódulos de manganeso parecen estar concentrados en la parte superior del suelo oceánico, y sugirieron que después del enterramiento tenderían a ser elevados a la superficie por temblores de tierra; ellos experimentaron con esferas de vidrio enterradas en arena gruesa y encontraron que estos nódulos experimentales eran forzados hacia la superficie bajo la influencia de las vibraciones. Pero los nódulos de manganeso descansan normalmente sobre arcilla plástica abisal, con una densidad más baja. Se podría esperar, si acaso, que se hundieran en la arcilla. El autor demostró experimentalmente (1958) que aún pequeños montones de arena se hunden dentro de una capa

de arcilla bajo la influencia de las vibraciones aunque la densidad de la arena está por debajo de la de los nódulos (ver más adelante).

En los experimentos citados la arcilla abisal fue reemplazada por arena, y este cambio en las propiedades mecánicas y en las densidades causó el que las esferas se movieran hacia arriba y no hacia abajo. Las pruebas no arrojan ninguna luz al problema de los nódulos sobre la arcilla.

Hay igualmente experimentos en los cuales la observación de un proceso lleva a una mejor comprensión de éste; un caso en cuestión es el desarrollo de los seudonódulos (*Luxemburgers*); estas estructuras se pueden producir sin deslizamiento, por asentamiento vertical, o sea por una especie de calco de carga. Un estrato de arena sobre una capa tixotrópica de arcilla, fue sometido a una vibración suave que simulaba un terremoto; la arena se rompió y se depositó en pedazos dentro de la arcilla; éstos fueron curvados en formas redondeadas o elipsoidales en unos pocos segundos, por el movimiento relativo de la arcilla envolvente. La arcilla envolvente fluye sobre y alrededor de la arena, plegando los bordes (Figs. 9 y 10).

Este experimento confirma que no hay necesidad de que exista ninguna caída, y aclara la formación de los cuerpos redondos; sugiere, además, que las "láminas de oscilación" pueden haberse desarrollado en la naturaleza donde no hay pendientes listas a causar deslizamientos; en la mayoría de los casos, sin embargo, los seudonódulos son producidos por una combinación de deslizamientos y calcos de carga (ver Kuenen, 1958). Algunas de las estructuras experimentales así producidas por calcos de carga, son similares a las texturas crioturbadadas (periglaciares), sugiriendo que algunos de los suelos de *permafrost* están deformados no solo por la presión de congelación sino por el calco de carga durante las condiciones superhidroplásticas del verano (Fig. 11).

El autor estableció lo anterior en 1958, y posteriormente Butrym y otros (1964) elaboraron y complementaron la misma idea.

En otros casos, los resultados de un experimento han sugerido una nueva hipótesis. Aunque el experimento puede servir nuevamente como una ilustración, su función principal es la de estimular la imaginación del geólogo; de esta manera, Escher y Kuenen (1924), produjeron plegamientos con ejes verticales en modelos de domos salinos, lo cual era una buena réplica de las formas similares de la naturaleza; la explicación por medio del flujo centrípeto hacia el extremo inferior del domo, fue sugerida por la estructura interna del modelo; sin embargo, la misma explicación hubiera podido ser ideada y sus-

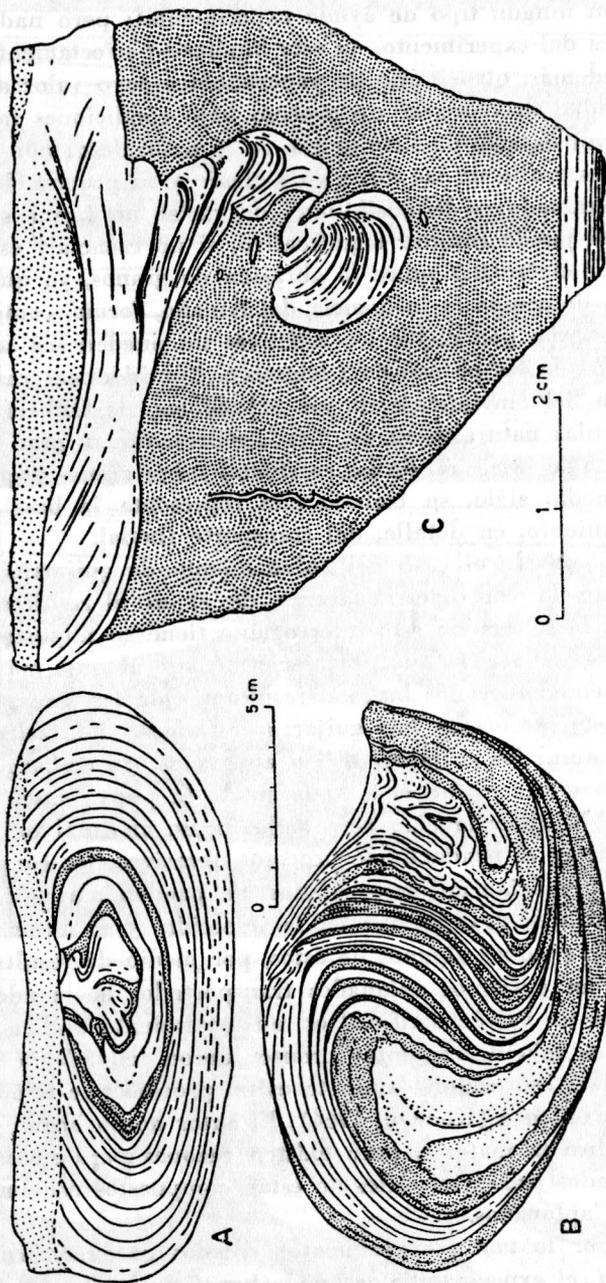


Fig. 3.—Tres pseudonódulos (*Luxemburgers*) del Devónico de Rivage, Ardennes. A y B son oblongos, de ángulos rectos a la sección y con extremos redondeados. B parece haber rodado sobre sí mismo. C ha sido deformado por compactación posterior del lado circundante (según van Straaten, 1954).

tentada con éxito por cualquier geólogo de campo con imaginación, sin contar con ningún tipo de ayuda experimental; pero nadie había pensado, antes del experimento, en esta hipótesis perfectamente lógica.

Existe, además, otro grupo de experimentos cuyo valor se deriva de la posibilidad de observar un proceso bajo condiciones favorables y por un mayor espacio de tiempo que en la naturaleza; por ejemplo, el origen y desarrollo de las marcas de oleaje y su propagación sobre un área determinada; o la posibilidad de variar un factor separadamente, lo cual puede resultar significativo, si no esencial; es el caso de las pruebas efectuadas sobre la abrasión de granos, ya que en las observaciones de campo la influencia del tamaño, forma, composición, velocidad y ataque por sustancias químicas no pueden ser separados y diferenciados de los procesos de selección. Por idénticas razones, el estudio acerca del movimiento de los sedimentos, de Gilbert (1914), usando partículas naturales en un canal, representó un gran paso en la comprensión de la acción de las corrientes sobre arenas y guijarros; después de medio siglo, su trabajo aún representa la base para el actual conocimiento, en detalle, del transporte fluvial.

Es muy conocido el caso del aplanamiento de guijarros en una playa, y existe la controversia acerca de si es el resultado de la abrasión o de la selección; este interrogante tiene su importancia, ya que la selección requeriría que prevalecieran bajo el agua más formas esféricas; los conglomerados basales, resultantes de las transgresiones, tenderían a estar formados por guijarros esféricos, si la selección es la verdadera causa; los guijarros serían aplanados, sin embargo, si hubieran viajado cierta distancia a lo largo de la playa, antes de acumularse sobre la discordancia; pero si la forma anormal de los guijarros de playa es el producto de procesos abrasivos, los conglomerados basales contendrían guijarros planos. Se pueden dar varios argumentos en apoyo de la hipótesis de la selección, y el autor tuvo la oportunidad de exponer algunos de éstos, por medio de resultados experimentales; los guijarros aplanados transportados hacia adelante y hacia atrás por un vaivén artificial en un movimiento deslizante, fueron adelgazados solo ligeramente; pronto fueron redondeados, y empezaron a rodar; este redondeamiento es un proceso que tiende a dominar al aplanamiento (Kuenen, 1964). El autor no ha hecho estudios estadísticos sobre la materia, pero existen razones para suponer que los conglomerados transgresionales no están compuestos usualmente de guijarros muy aplanados.

Existen, por lo tanto, experimentos creados para confirmar una hipótesis; aquí, el experimentador puede beneficiarse a menudo de la posibilidad de simplificar las condiciones. Como un ejemplo se puede

0 5 10 cm

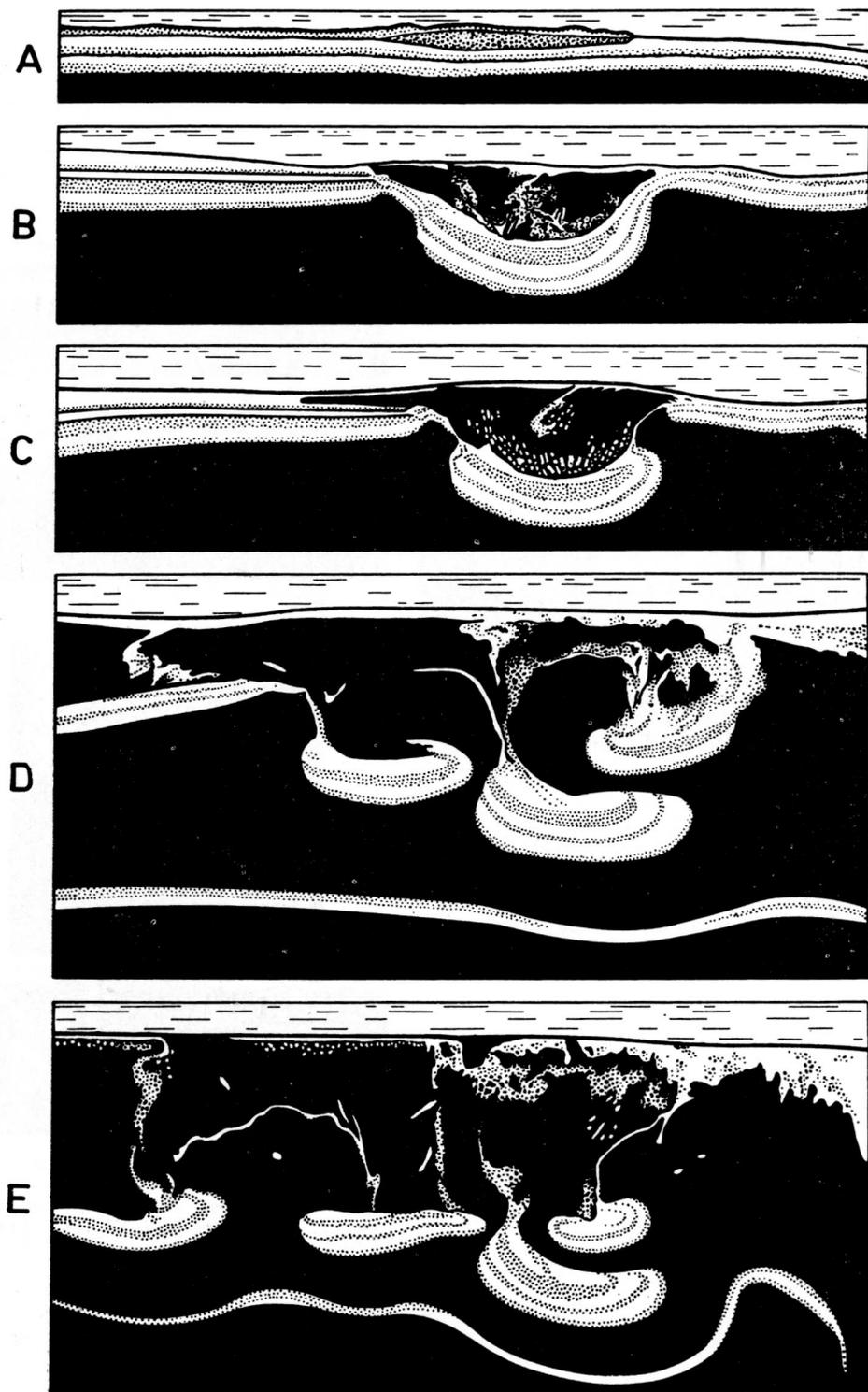


Fig. 9.—Seudonódulos experimentales (*Luxemburgers*) formados como consecuencia de la vibración de una capa de arena con una sobrecarga local (A), la cual descansa sobre arcilla no consolidada. Note el flujo de lodo alrededor del cuerpo en forma de bandeja, que produce la estructura en forma de riñón. El lodo ha fluído por la pared de vidrio del tanque, y ha cubierto la capa, como se ve en B. Note el movimiento oblicuo del nódulo más pequeño, y la deformación de una lámina liviana cerca al fondo. (Ver Kuenen, 1958, Plate I, para las etapas alternas).

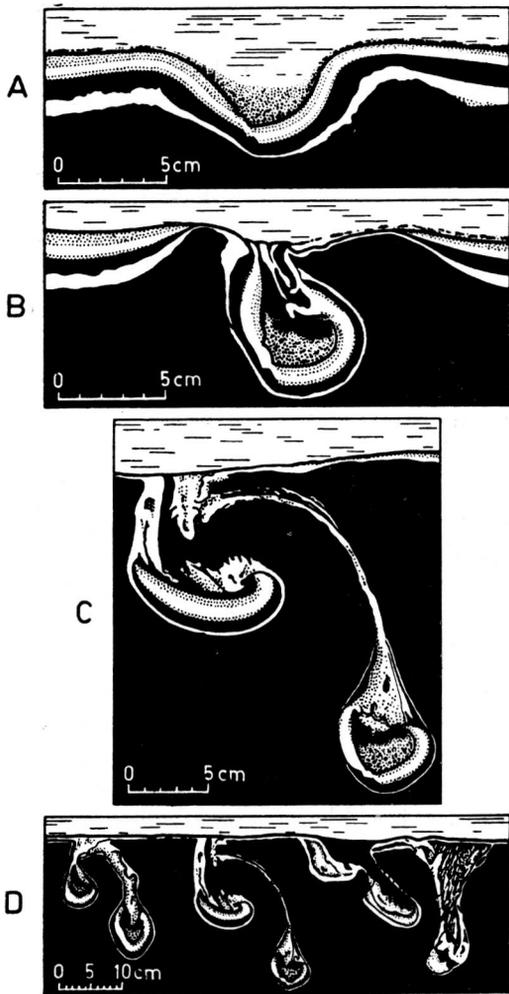


Fig. 10.—Seudonódulos experimentales. Note en el último dibujo que toda la capa se rompe, al empezar a hundirse en un sitio a causa de un pequeño peso de arena (ver Kuenen, 1958, Plate II, para las etapas alternas).

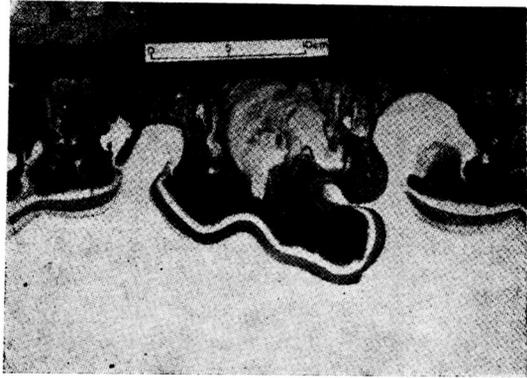


Fig. 11.—Lámina movediza experimental, que recuerda las estructuras crioturbadadas.

citar una investigación reciente hecha por el autor; se han hecho varios intentos para explicar la laminación hallada en ciertas zonas de grano más fino de las turbiditas; se ha citado, entre otros, el flujo laminar, los vórtices, las pulsaciones de corrientes, las nubes de suspensión separadas y los ritmos climáticos anuales; el autor supuso que una deposición lenta a partir de una corriente uniforme produciría láminas automáticamente. Los flujos experimentales desacelerados en un canal circular tienen mucho en común con la acción de las corrientes de turbidez; por este mecanismo se produce estratificación gradual, marcas de oleaje, convoluciones y laminación a partir de una suspensión muy pesada; la corriente en el aparato usado está dividida por unas paletas en ocho *celdas*, de manera que prácticamente se suprimen todas las pulsaciones y vórtices mayores; la laminación se produce en una ancha gama de velocidades en tamaños del grano que van desde arena gruesa hasta limo, suponiendo que la acumulación no es muy rápida; se han hallado alternaciones de láminas con diámetros medios que difieren por un factor de 2 a 3, y concentraciones de partículas de ladrillo desde un promedio de 10% en el sedimento a 75% en algunas láminas (Fig. 12).

Estos resultados evidencian la posibilidad de desarrollo de la laminación horizontal bajo condiciones de flujo no pulsátil; esto confirma y extiende los hallazgos anteriores por Einstein y otros de que el flujo uniforme puede producir laminación horizontal (ver Jopling, 1964). Los resultados actuales demuestran igualmente la tendencia "de los pájaros de una misma pluma a volar en bandadas". En estas pruebas, y probablemente también en las corrientes de turbidez, la causa principal de las láminas horizontales no son, evidentemente, las fluctuaciones en la corriente, sino que los granos del mismo tamaño, densidad y forma, se extienden como parches sobre el fondo; se colocan uno sobre otro, y pasan sobre los demás granos de diferente constitución. Los resultados apoyan las ideas deducidas con tanta propiedad por Moss (1963), acerca del análisis de los granos de láminas naturales (hay un trabajo detallado en preparación).

La función de los experimentos geológicos, expuesta en el párrafo anterior, se puede resumir así: ilustrar, clarificar, probar o excluir explicaciones sugeridas o procesos imaginados, suministrar nuevos conceptos, proveer datos, permitir la inspección de los procesos, facilitar el estudio de los procesos naturales simplificados.

En el pasado, la geología se ha ocupado ampliamente del registro y de la observación; la documentación ha excedido en mucho a los intentos de dar una explicación, y los aspectos cualitativos han sido mejor comprendidos que los cuantitativos. Hay una urgencia, que va en aumento, hacia una mayor exactitud y un conocimiento más profundo de los procesos involucrados⁴; puede ser que en este camino de la geología hacia una disciplina más exacta, los procedimientos experimentales estén destinados a jugar un significativo papel siempre en aumento.

El lento avance de la geología experimental en el pasado ha sido tomado por la mayoría de los geólogos como una prueba de que la nuestra no es una ciencia experimental; consideran los experimentos de campo como de un valor dudoso y ven las pruebas de laboratorio con sincera desconfianza. Difícilmente pueden ser culpados si consideramos las burdas y falsas representaciones y conclusiones erradas que han resultado de muchos experimentos; puede parecer atrevido, por consiguiente, predecir un importante futuro para esta línea de ataque de los problemas geológicos; sin embargo, algunas de las causas de los resultados deficientes hallados en el pasado, no son necesariamente permanentes.

Se pueden citar muchos ejemplos en el desarrollo científico, en que hubo necesidad de esperar ciertos adelantos en otros campos de la ciencia, antes de progresar; la cura de las enfermedades internas no empezó a hacer avances espectaculares sino en las primeras décadas de este siglo, cuando la química orgánica experimentó un desarrollo suficiente; cuántos avances explosivos en la física, la química, la meteorología, la astronomía, etc., no llegaron sino al encontrarse nuevas herramientas de trabajo. Como un ejemplo dentro de las ciencias de la tierra, uno no necesita sino recordar el tardío desarrollo de la petrografía, hasta el momento en que se introdujo el microscopio polarizante.

Existen actualmente muchas técnicas de medida, materiales, dispositivos de registros, etc., desconocidos hace una generación, los cuales pueden ser aplicados a los experimentos geológicos; los éxitos de la ingeniería de canales y de costas, de la mecánica de suelos, el uso de rastreadores para identificar partículas, métodos matemáticos, es-

⁴ Para un análisis reciente del desarrollo de las ciencias de la tierra, ver P. E. Cloud, *Science*, 1964, vol. 144, pp. 1428-1431.

tán todos a la disposición de los geólogos para su uso directo, o como ejemplos dignos de imitar.

Si se comparan las posibilidades técnicas a la disposición de hombres como Holl o Daubrée, antes del advenimiento de los plásticos, la electricidad, la fotografía y muchas otras ayudas y herramientas, con las existentes actualmente a nuestra disposición, no hay duda de que se pueden llevar a cabo métodos de prueba que ellos ni siquiera imaginaron.

No menos importante es la facilidad económica actual; en casi todos los países a los científicos se les permiten gastos mucho más cuantiosos que antes de la Segunda Guerra Mundial; aunque los geólogos no están tan capacitados financieramente como los físicos o los químicos, se le han asignado a nuestra profesión grandes sumas de dinero. Los geólogos tienden a gastar su presupuesto en trabajos de campo, secciones delgadas, microscopios, literatura, instrumentos petrográficos, fotografía, análisis químicos, etc.; aunque los costos del trabajo experimental dependen en gran parte de la clase de investigaciones llevadas a cabo, no es necesario que excedan lo que es usual en nuestra ciencia; por consiguiente, en la mayoría de los países, la ayuda financiera debería ser rápida, para financiar programas no muy ambiciosos.

La causa principal para la continua falta de madurez de la geología experimental no es, por consiguiente, la falta de fondo o de temas apropiados, sino la escasez de geólogos con la inclinación y habilidad para llevar a cabo un programa en este campo; en parte esta escasez se puede atribuir a una orientación mental fija; tradicionalmente, un geólogo es un observador de fenómenos en el campo o de especímenes en el laboratorio; se le ha enseñado a preguntar sus dudas a la naturaleza y no a un robot de laboratorio; puede haber muchos geólogos de campo que hubieran llegado a ser excelentes experimentadores si hubieran recibido el estímulo durante su entrenamiento no solo para *observar*, sino también para *ensayar*. Probablemente, sin embargo, existe igualmente una mezcla no usual de actividades e intereses que se requieren para llegar a ser un experimentador de éxito, y los jóvenes de este tipo se han dedicado más bien a la química, la física o la ingeniería. De la misma manera que muy pocos geólogos, aun los de mayor fama, hubieran podido llegar a ser buenos físicos o ingenieros, o viceversa, existen tal vez pocos geólogos, también eminentes en sus especialidades, que poseen la combinación especial de habilidades que los capacitan para llegar a ser unos experimentadores consumados: esto se deduce del hecho de que muy pocos geólogos han continuado

experimentando después de una o dos incursiones y que muchas investigaciones experimentales han resultado completos fracasos.

Es razonable esperar, sin embargo, que la creación de condiciones convenientes para el trabajo experimental en los departamentos de geología contribuirá a atraer a unos pocos estudiantes con las condiciones indicadas para especializarse en este campo; esto también contribuirá a enfocar la atención de otros hacia la posibilidad de usar los métodos experimentales al unísono con las técnicas geológicas clásicas para adicionar sus investigaciones o resolver problemas específicos.

No obstante lo anterior, la experiencia personal del autor le permite dudar de si sería prudente para los geólogos de campo intentar experimentos por cuenta propia; aparte de la falta de certeza para determinar si la clase y pulimento de la profesión tienen posibilidades experimentales, existe el problema del tiempo; cuando la idea de trabajar en algún experimento determinado viene a la mente por primera vez, existe la aptitud para imaginar que se puede llegar rápidamente a algún resultado; lo contrario es casi siempre lo verdadero. Para empezar, el experimentador debe pensar en la totalidad del problema y en la mejor manera de resolverlo; luego, debe construir su aparato, y esto significa largos retrasos, esperando los materiales y la construcción del instrumento; muchas pruebas implican períodos extensos de acción lenta, tiempo para el asentamiento y consolidación, tediosos análisis químicos o mecánicos, pesadas numerosas y otras medidas; a menudo, en una etapa posterior, el aparato debe ser rediseñado o adicionado; en este momento y después, existe la tendencia a estrellarse contra algún obstáculo; el autor ha gastado meses y años antes de hallar la solución de algún problema, y mientras tanto hay que ocuparse de otra investigación; en algunos problemas se pueden gastar muchos meses tratando vanamente de vencer lo que parecía a primera vista una pequeña dificultad; el retirarse del experimento se convierte en una frustración desalentadora, mientras mayor haya sido el tiempo gastado.

Cuando las dificultades experimentales han sido vencidas y el programa llevado a cabo en su totalidad, de manera que están disponibles los datos, fotografías, películas sedimentarias, etc., está aún por resolver la difícil tarea de la interpretación y aplicación a las condiciones naturales; la experimentación lo introduce a uno a campos desconocidos de la geología que requieren mucha lectura, lo cual se traduce en otro gasto de tiempo; sumando todo lo anterior, pueden pasar muchos años desde la convicción de que un problema puede

ser estudiado por medio de experimentos hasta la terminación del manuscrito, aun si el tiempo gastado es solamente de varios meses.

Naturalmente, puede existir la fortuna de obtener una solución rápida de un problema; o, recíprocamente, un comienzo sencillo puede conducir algunas veces a un extenso programa que suministra material uniformemente a varias investigaciones separadas; de todos modos, la geología experimental consume mucho tiempo, y no es un pasatiempo de fines de semana. Aunque el geólogo de campo, en general, no está, obviamente, en la posición de emprender estudios experimentales por sí mismo, sí está eminentemente calificado para sugerir tópicos de estudio al experimentador.

Otra razón para esperar que aumente la importancia de los experimentos en geología es la de que en todas las ciencias cuyo objeto es el estudio del mundo natural, como la astronomía, la biología y la oceanografía, se le está dando mayor atención al uso de los métodos y principios más originales derivados de la química y la física; al mismo tiempo, una legión de hombres entrenados en estos dos campos fundamentales del conocimiento, se sienten atraídos por la posibilidad de aplicar sus métodos y su sistema teórico de trabajo a los aspectos del mundo alrededor nuestro; el objetivo último es, después de todo, el de explicar nuestro universo por las leyes generales de la naturaleza, y de este modo los compartimentos que dividen la ciencia quedan eliminados; la geología en su sentido original, que significa el estudio de la tierra, no es ninguna excepción, ya que la geofísica y la geoquímica son migmatitas de la ciencia, y la geología estructural y la petrografía están sufriendo intenso metamorfismo de contacto; la geocronología ha experimentado un resurgimiento por la invasión del icor de la radiología. Del amplio campo original del dominio de la geología, hay cada vez menos materias del exclusivo interés de la profesión geológica.

Se admite que las ciencias que estudian la vida, ya sea contemporánea o fósil, encierran un elemento propio; además, el geólogo no puede trabajar sin ese sistema especial que vagamente se llama *pensamiento geológico*; con todo, la línea general mencionada arriba es obvia, y tarde o temprano la geología deberá emerger en gran parte con la física y la química; una gran parte de este esfuerzo estará dirigido hacia la identificación y medida, por medio de un gran número de métodos físicos y químicos; las determinaciones de edades, los análisis de trazas de elementos y las medidas paleomagnéticas no son sino unos pocos ejemplos; pero estos proyectos, como la microscopía, no son experimentales. Sin embargo, si la irrupción de la física

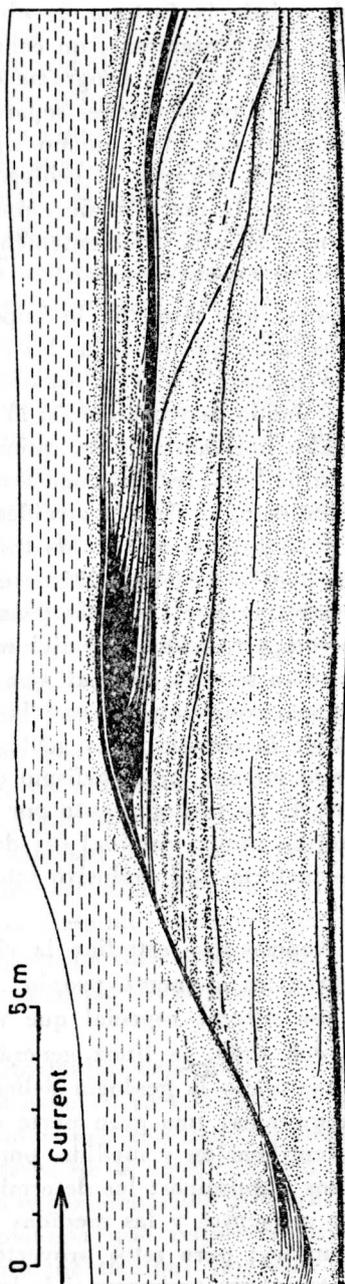


Fig. 12.—Depósito laminado con marcas de oleaje. Las líneas oscuras son ladrillo triturado en abundancia. Formado en 75 minutos por corrientes no pulsátiles desacceleradas gradualmente.

y la química en el campo de la geología va a continuar, entonces, obviamente, se puede esperar que el principal método por el cual estas dos ciencias fundamentales han progresado —el sistema experimental—, penetre igualmente en el campo de la geología.

Muchos gastos de energías se evitarán si los geólogos toman una parte activa en este predecible desarrollo; una cooperación estrecha entre físicos, químicos y geólogos, en un programa dirigido hacia la experimentación geológica, producirá probablemente los mejores resultados; porque dejado a su propia iniciativa, el científico no entrenado en geología es probable que subestime la complejidad de los procesos geológicos; producirá entonces declaraciones apodícticas, como los estimativos clásicos de la edad de la tierra; o será tan cauteloso en sus intuiciones que sus resultados serán únicamente fundamentales y de ninguna ayuda al resolver los problemas geológicos. Pero si al geólogo se le permite hacer la parte del tonto que demanda de sus diez hombres más hábiles más de lo que ellos pueden responder, entonces hay una oportunidad de que gocen juntos en el paraíso de los tontos de la geología y traigan por lo menos unas primeras aproximaciones de las respuestas.

Otro punto importante para ser tenido en cuenta es el de que así como la prueba de un pastel está al comerlo, así el verdadero terreno de prueba para el geólogo experimentador está en el campo o bajo el microscopio.

ALGUNAS REFERENCIAS

- BAGNOLD, R. A. (1941). — *The physics of blown sand and desert dunes*. London, 265 pp.
- BUCHER, W. H. (1956). — *Role of gravity in orogenesis*. Bull. Geol. Soc. Amer., 67, pp 1295-1318.
- CLOOS, H. (1929). — *Künstliche Gebirge*. I. Nat. u. Mus. Senckenb. Naturf. Ges., Frankfurt, pp. 225-243.
- (1930). — *Künstliche Gebirge*. II. Ibid., pp. 258-269.
- DAUBRÉE, A. (1879). — *Etudes synthétiques de géologie expérimentale*. Paris, 828 pp.
- ESCHER, B. G. (1955). — *Über den Wert geologischer Experimente*. Festgabe des G.E.P., Techn. Hochschule, Zürich, pp. 143-156.
- ESCHER, B. G. and Ph. H. KUENEN (1929). — *Experiments in connection with salt domes*. Leidsche Geol. Med., 3, pp. 151-182.
- GILBERT, G. K. (1914). — *Transportation of debris by running water*. U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 86.
- GILL, W. D. and Ph. H. KUENEN (1958). — *Sand volcanoes on slumps in the Carboniferous of County Clare, Ireland*. Quart. Jour. Geol. Soc. London, CXIII, pp. 441-460.
- HALL, SIR JAMES (1815). — *On the vertical position and convolutions of certain strata and their relation with granite*. Trans. Roy. Soc. Edinburgh, 7, pp. 79-108.
- HUBBERT, M. K. (1937). — *Theory of scale models as applied to the study of geologic structures*. Bull. Geol. Soc. Amer., 48, pp. 1459-1520.
- KUENEN, Ph. H. (1928). — *Experiments on the formation of windworn pebbles*. Leidsche Geol. Med., 3, pp. 17-38.
- (1934). — *Experiments on the formation of volcanic cones*. Leidsche Geol. Med., 6, pp. 99-118.
- (1936). — *The negative isostatic anomalies in the East Indies (with experiments)*. Leidsche Geol. Med., 8, pp. 169-214.
- (1937). — *Experiments in connection with Daly's hypothesis on the formation of submarine canyons*. Leidsche Geol. Med., 8, pp. 327-351.

- (1938). — *Observations and experiments on ptygmatic folding*. Bull. Comm. Géol. Finlande, 123, pp. 11-28.
 - (1950). — *Turbidity currents of high density*. Report 18th Intern. Geol. Congr., Pt. 8, London, 1948, pp. 44-52.
 - (1951). — *Properties of turbidity currents of high density*. Soc. Econ. Pal. Min., Spec. Publ. N^o 2, pp. 14-33.
 - (1955). — *Experimental abrasion of pebbles*. 1. Wet sand blasting. Leidse Geol. Med. 20, pp. 131-137.
 - (1956). — *Experimental abrasion of pebbles*. 2. Rolling by current. Jour. Geol., 64, pp. 336-368.
 - (1958). — *Experiments in geology*. Trans. Geol. Soc. Glasgow, 23, pp. 1-28 (with more extensive bibliography).
 - (1959). — *Experimental abrasion*. 3. Fluvial action on sand. Amer. Jour. Sci., 257, pp. 172-190.
 - (1960). — *Experimental abrasion*. 4. Eolian action. Jour. Geol., 68, pp. 427-449.
- KUENEN, Ph. H. and H. W. MENARD (1952). — *Turbidity currents, graded and non-graded deposits*. Jour. Sed. Petrol., 22, pp. 83-96.
- and C. I. MIGLIORINI (1950). — *Turbidity currents as a cause of graded bedding*. Jour. Geol., 58, pp. 91-127.
 - and W. G. PERDOK (1962). — *Experimental abrasion*. 5. Frosting and defrosting of quartz grains. Jour. Geol., 70, pp. 648-658.
 - and L. U. DE SITTER (1938). — *Experimental investigation into the mechanism of folding*. Leidse Geol. Med., 10, pp. 217-240.
- McKEE, E. D. (1947). — *Experiments on the development of tracks in fine cross-bedded sand*. Jour. Sed. Petrol. 17, pp. 23-28.
- (1957). — *Flume experiments on the production of stratification and cross-stratification*. Jour. Sed. Petrol. 27, pp. 129-134.
- MEUNIER, S. (1899). — *La géologie expérimentale*. Paris, 311 pp.
- MOSS, A. J. (1963). — *The physical nature of common sandy and pebbly deposits*. Part II. Amer. Jour. Sci., 261, pp. 297-343.
- OULIANOFF, N. (1961a). — *Rides (ripple marks) sur les fonds océaniques et courants sous-marins*. C.R. Acad. Sci., 253, p. 507.
- (1961b). — *Rides sous-marines (ripple marks)*. Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne, 130, pp. 1-12.
- WHITE, W. A. (1961). — *Colloid phenomena in sedimentation of argillaceous rocks*. Jour. Sed. Petrol., 31, pp. 560-570.
- WILLIS, B. (1893). — *The mechanism of Appalachian structure*. U.S. Geol. Survey, 13th Ann. Rep., Pt. 2, pp. 211-282.

EJEMPLOS DE INVESTIGACIONES RECIENTES

- BUCHER, W. H. (1963). — *An experiment on the role of gravity in orogenic folding*. Geol. Rundschau, 52, pp. 804-809.
- BUTRYM, J., et al., (1964). — *New interpretation of "periglacial structures"*. Folia Quat., 17, Polska Akad. Nauk., Krakow, 34 p.
- DANCEARD, L. et al. (1964). — *Figures et structures observées au cours du tassement des vases sous l'eau*. C.R. Acad. Sci. Paris, 258, pp. 5935-5938.
- DONATH, F. A. (1963). — *Fundamental problems in dynamic structural geology*. The Earth Sciences, editor T. W. Donnelly, Univ. Chicago Press, pp. 83-103.
- DZULYNSKI, S. (1963). — *Polygonal structures in experiments and their bearing upon some periglacial phenomena*. Bull. Acad. Polon. Sci., Série Géol., Géogr. XI, pp. 145-150.
- DZULYNSKI, S., and E. K. WALTON (1963). — *Experimental production of sole markings*. Trans. Edinburgh Geol. Soc., 19, pp. 279-305.
- FLEMMING, N. C. (1964). — *Tank experiments on the sorting of beach material during cusp formation*. Jour. Sed. Petrol., 34, pp. 112-122.
- JOHANSSON, C. E. (1963). — *Orientation of pebbles in running water, a laboratory study*. Geogr. Annaler, XLV, pp. 85-112.
- JOPLING, A. V. (1964). — *Laboratory study of sorting processes related to flow separation*. Jour. Geophys. Res., 69, pp. 3403-3418.
- KENN, M. J. (1964). — *Experiments simulating the effects of mountain building* (Abstract). Geol. Assoc. Sess. N° 663, pp. 2-3.
- KUENEN, Ph. H. (1963). — *Experimentele sediment-structuren*. Kon. Ned. Akad. Wetensch. A'dam. Versl. Gew. Verg. Afd. Nat., 72, N° 5, pp. 65-66.
- (1964). — *Experimental abrasion*. 6. Surf action. Sedimentology, 3, pp. 29-43.
- OLAUSSON, E. and S. UUSITALO (1963). — *On the influence of seismic vibrations on sediments*. C.R. Soc. Géol. Finlande, 35, pp. 101-114.
- RAMBERG, H. (1963). — *Experimental study of gravity tectonics by means of centrifuged models*. Bull. Geol. Inst. Uppsala, 42, pp. 1-97.
- SIVAKOV, N. K. (1963). — *Wave action and the development of the outer foreshore margin*. Intern. Geol. Review, 5, pp. 1440-1445.
- TANNER, W. F. (1963). — *Origin and maintenance of ripple marks*. Sedimentology, 2, pp. 307-311.
- WIMAN, S. (1963). — *A preliminary study of experimental frost weathering*. Geogr. Annaler, XLV, pp. 113-121.