

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FISICAS Y NATURALES

LA PROSPECCION SISMICA
EN ESPAÑA

DISCURSO

LEIDO EN SOLEMNE SESION INAUGURAL DEL CURSO
ACADEMICO DE 1950-51

por el Ilmo. señor

D. VICENTE INGLADA ORS

EL DIA 12 DE NOVIEMBRE DE 1950



1950
NUEVAS GRAFICAS
Rodríguez San Pedro, 51
MADRID

SEÑORES ACADEMICOS :

ASISTIMOS en el momento presente a una interesante fase de la evolución de la Geofísica que, no contenta de estudiar y analizar los fenómenos físicos que tienen asiento y teatro a la vez en el globo terrestre, trata de provocarlos para buscar en sus capas superficiales las riquezas minerales ocultas, tan codiciadas del hombre en esta época en que la crisis económica alcanza a todos los países.

Esta geofísica aplicada, que nace en el siglo xx, trata ya de deslumbrarnos con sus brillantes investigaciones y resultados, de carácter eminentemente utilitario, y sigue el ritmo acelerado del progreso científico, que todo lo renueva con febril actividad y en sus audaces concepciones parece complacerse en destruir, para edificarlo sobre nuevos cimientos, el espléndido edificio científico que elevaron tantas generaciones de sabios y beneméritos investigadores.

Entre los métodos geofísicos de prospección, el gravimétrico, magnético, sísmico y eléctrico se aplican ya de un modo general y con satisfactorios resultados. Los restantes, basados en las medidas geotérmicas, propiedades radioactivas, corrientes telúricas, etcétera, están en período de formación y hasta ahora no han dado seguros resultados.

Dado el progreso rapidísimo de estos estudios geofísicos, no es posible, por falta de tiempo, exponer los resultados de todos los métodos de prospección, al cumplir el honroso encargo que nos dió la Academia—y que profundamente agradecemos—de llevar su voz en esta solemne inauguración de curso. Nos limitaremos, pues, a hacer breve reseña de los resultados obtenidos en los trabajos de prospección sísmica, con mención especial de los españoles, que, apenas iniciados por el Instituto Geológico, alcanzan ya singular importancia y prometen facilitar en grado sumo la explotación minera de nuestro suelo.

* * *

Al registrar por primera vez, en 1889, el malogrado geofísico alemán von Rebeur-Paschwitz, un sismo japonés, cuyo foco se hallaba a 9.000 kilómetros de distancia, los sismólogos, deslumbrados por tan importante descubrimiento, anunciado ya por Milne seis años antes, aplicáronse febrilmente a perfeccionar los sismógrafos empleados, a establecer la teoría de su funcionamiento y a aplicar tan valioso medio de investigación al estudio de la constitución interna de la masa del Globo.

El interior de la tierra, misteriosa cuestión que en todas las centurias había atraído la atención de tantos filósofos y hombres de ciencia, y originado teorías más o menos fantásticas, basadas en presunciones y conjeturas, iba por fin a explorarse por procedimiento verdaderamente científico, con los datos fidedignos que el rayo sísmico, eterno viajero del mundo subterráneo, iba depositando en las gráficas registradas por los sismógrafos automáticos.

No es de extrañar que los sismólogos, llevados de su entusiasmo por descubrir el secreto de las capas profundas del Globo, atendieran preferentemente a la propagación de las ondas sísmicas y que este fenómeno, puramente físico, preponderara por la

facilidad con que se prestaba a la investigación, en tanto que el aspecto geológico del problema, relativo a la génesis, causa y naturaleza de los sismos, pasaba a ocupar un lugar secundario, si no se olvidaba en ciertos casos.

Y al mismo tiempo que esta Astronomía subterránea—como llamábala acertadamente el profesor húngaro R. von Kövesligéthy—avanzaba y conquistaba nuevos resultados, los llamados «hombres prácticos», que atienden sólo al fin utilitario de las investigaciones, eternos Sanchos Panza que son los primeros en beneficiarse del progreso científico, aunque lo retarden con sus burlas escépticas, seguían preguntando, irónica y maliciosamente, a los sismólogos: «¿De qué sirven esas lucubraciones, si no permiten prever los terremotos, ni evitar sus efectos destructores?»

No está al alcance del hombre regir los fenómenos naturales que estremecen la masa del Globo, ni evitar, por lo tanto, los sismos; muy difícil, si no imposible, parece por ahora preverlos; pero es también cierto que la Sismología fija las zonas en que tembló y seguirá temblando la Tierra; indica en ellas los puntos en que han de asentar los edificios, así como la manera de construirlos y clase de materiales que han de ser empleados, para que los efectos de las sacudidas sísmicas se reduzcan al mínimo. Aquí tenemos una aplicación útil, de carácter humanitario, de la Sismología; pero el hombre, y los Municipios particularmente, no prestan gran atención a estas reglas de construcción antisísmica; sólo en momentos de catástrofes sísmicas, ante el desolado aspecto de tantos pueblos arruinados y de tantas víctimas sepultadas en sus propios hogares, la Humanidad, loca de pánico y duramente escarmentada por el azote sísmico, pide, angustiada, a los sismólogos que eviten tantos daños, cuando ya los produjo el terremoto.

En la IV Asamblea general de la Unión Internacional Geodésica y Geofísica, celebrada en Estocolmo en Agosto último, tuvimos el honor de que se aprobara unánimemente una propuesta

nuestra, en que se llama la atención de los Gobiernos acerca de la importancia del estudio de las capas superficiales, a fin de elegir los terrenos más favorables en caso de reconstrucción de poblaciones destruídas por los sismos.

¿Se tendrá en consideración esta propuesta, o vencerá la apatía humana y el perjuicio que origine a los dueños de las casas el construirlas de nuevo en solares que no les pertenecen y habrán de comprar abandonando el propio?

En el megasismo japonés de 1.º de Septiembre de 1923, que produjo 99.000 muertos, 104.000 heridos y 43.000 desaparecidos, el 95 por 100 de las víctimas y daños causados se debió al incendio que siguió al sismo, y devoró nada menos que 447.000 edificios. Los sismólogos japoneses—especialmente el célebre profesor Omori—habían aconsejado al pueblo de Tokio el aumento de las tuberías y conductos de agua, que se habían mostrado insuficientes hasta en el caso de sismos no muy violentos. El profesor A. Imamura anunció en el diario *Taiyo*, en 1905, la posibilidad de que en Tokio ocurriera un sismo destructor y el peligro de que la ciudad fuera pasto de las llamas, si no se adoptaban medidas urgentes que mejorasen su servicio de incendios. Estudió con todo detalle el caso de declararse el fuego, que podría causar un centenar de miles de víctimas—como sucedió en 1923—, pero el público no se dignó escuchar a Imamura y hasta no faltó un intelectual eminente, que en dicho año y luego en 1915, ridiculizara al sismólogo japonés, porque propalaba un rumor que causaba en el público pánico infundado.

A más de la aplicación a las construcciones antisísmicas, la Sismología ofrece la de la prospección, que es para el hombre de singular utilidad e importancia. Extraño parece que, conocido el empleo de los sismogramas en el estudio de la constitución interna del Globo, no se ocurriera a los sismólogos utilizar las gráficas obtenidas durante las explosiones para la exploración, con fines geológicos o mineros, de las capas superficiales, a pesar de que

Schmidt, en 1888, había ya hecho una sugestión en tal sentido.

Posteriormente, Belar, Benndorf y el Príncipe Galitzin insistieron en esa aplicación sísmica de las explosiones; pero hasta 1919, en que el Dr. Mintrop sacó una patente de dicho método de prospección, no se inició y practicó ésta de un modo sistemático.

La prospección sísmica se basa en la obtención de un cierto número de perfiles, dispuestos convenientemente en la zona explorada. Para cada uno se elige un cierto punto, en que se produce la explosión, y en la alineación que pasa por él se sitúan los sismógrafos registradores, a distancias, unos de otros, de algunos hectómetros, en los puntos más próximos al de la explosión. Al aumentar la distancia, los sismógrafos pueden situarse de kilómetro en kilómetro. Las distancias a que han de colocarse los sismógrafos portátiles dependen del problema propuesto, de la profundidad a que estén las capas exploradas, de la estructura geológica, etc. Si trazado un perfil, y construída la dromocrónica correspondiente, se observa que las estaciones no están bastante próximas en algún trozo, se procede a la intercalación de otras en la medida que aconseje el trazado de aquella.

Como generalmente se dispone de un equipo de cinco o seis sismógrafos, colocándolos a distancias, unos de otros, de unos 400 metros, el perfil no puede llegar más que a un par de kilómetros; si se necesita prolongarlo hasta cinco o seis—y esta longitud no es corriente rebasarla—, se repite la explosión, previa la nueva instalación de los sismógrafos a continuación de las posiciones del primer perfil y más espaciados que en éste.

En el caso de disponerse de un solo sismógrafo, hay que multiplicar las explosiones e ir sucesivamente colocando éste en las posiciones que al mismo tiempo ocupaban los del equipo, lo que aumenta la duración de los trabajos, los gastos del consumo de explosivo y los destrozos causados por éste, sin contar con el peligro que supone su transporte y empleo.

El problema sísmico de la prospección es de sencillez extrema con relación al de la Sismología ordinaria: mientras que en ésta se desconoce la posición del epicentro, la profundidad del foco y la hora a que ocurre el sismo, en la prospección, por el contrario, se sabe exactamente la situación del punto de la explosión, la hora a que se produce, las distancias a cada una de los sismógrafos registradores—que pueden medirse con toda exactitud—y, por último, el azimut del epicentro, que es la dirección del perfil elegido.

En la prospección, el foco es puntiforme y situado en la superficie terrestre, de modo que se cumplen con todo rigor las condiciones teóricas que admite la Sismometría para establecer sus ecuaciones fundamentales y las fórmulas que de ellas se derivan.

En la Sismología ordinaria, las distancias epicentrales se evalúan en kilómetros; las horas de los impulsos registrados, en segundos redondos, y la amplificación de los sismógrafos no suele exceder de 200 a 300 veces. En la prospección las distancias se pueden medir en metros, las horas de los impulsos se registran a la milésima de segundo, y la amplificación instrumental varía de 50.000 veces hasta un millón, que se cree alcanzada en algunos tipos recientes. Vemos, pues, que las magnitudes fundamentales del estudio sísmico, guardan la misma relación, en el sentido de que en la prospección hay una precisión mil veces mayor que en el registro ordinario de los sismos, de modo que el problema técnico es el mismo. Por esto no ha de extrañarnos el hecho sumamente curioso de que el aspecto de los sismogramas no difiera esencialmente del obtenido en las explosiones, cuyas gráficas no suelen extenderse más de un segundo, en tanto que la de los terremotos dura varios minutos y horas enteras, si la distancia epicentral es considerable.

En los sismos artificiales debidos a las explosiones, la energía es ínfima, comparada a la de los grandes terremotos, de foco profundo, y en que a veces se mueve en bloque un gran comparti-

miento de la corteza ; pero, gracias a la potente amplificación de los aparatos registradores y a la pequeñísima distancia del foco a que se colocan, pueden registrarse tan débiles estremecimientos superficiales.

Puesto que en la prospección se cumplen las condiciones teóricas del foco puntiforme y superficial, los sismos por ella utilizados son verdaderamente ideales y, por tanto, de gran interés aún para problemas teóricos de la propagación de las ondas elásticas por medios sólidos y anisótropos. Pero aquí hemos de lamentarnos de un exclusivismo técnico, que lleva a una concepción parcial del problema, sólo del lado práctico, con olvido completo del teórico : el geofísico, preocupado con el problema de la prospección, atiende sólo a deducir la hora del impulso inicial de la gráfica, que le basta para hallar la posición y profundidad del criadero que busca, y prescinde de todo lo demás, que para él es secundario.

Pero cabría que, una vez resuelto el problema práctico, las gráficas de la prospección se entregasen a los sismólogos para que las analizaran, ya que son de extraordinario interés, por la pequeñez de las distancias a que se han registrado, para el estudio de los sismos próximos.

Desgraciadamente, los trabajos de prospección se mantienen en general secretos ; se ocultan los detalles de construcción y manejo de los instrumentos, las fórmulas y procedimientos empleados y los resultados obtenidos. En la III Asamblea general de la Unión internacional Geodésica y Geofísica, celebrada en Praga en Septiembre de 1927, el Secretario de la Sección de Sismología, profesor E. Rothé, se lamentaba del secreto de esta clase de trabajos, y uno que se había anunciado presentar a la Asamblea por un geofísico italiano, fué retirado a última hora, porque la Compañía que había contratado la prospección, no autorizó al autor a que publicase los resultados.

En la IV Asamblea general, que acaba de celebrarse en Es-

tolmo, el mismo profesor ha propuesto la conveniencia de que los Gobiernos y Sociedades comuniquen a dicha Unión Internacional los resultados de los trabajos de prospección que hubiesen efectuado, y para nosotros fué motivo de orgullo hacer constar que España se había adelantado a dicha petición, pues su Instituto Geológico y Minero, no sólo publica en su *Boletín* los resultados de dicha clase de trabajos, sino que da cuenta minuciosa de los instrumentos y métodos empleados, y hace el estudio crítico y comprobación, por medio de sondeos, de la utilidad y eficacia de las fórmulas, aparatos y procedimientos.

Los aparatos empleados en la prospección pertenecen a las más variadas clases de sismógrafos, acelerógrafos y vibrógrafos, ya de tipo mecánico, como el ideado por el Dr. Mintrop para el registro de la componente vertical, que han adoptado y perfeccionado en Norteamérica varias Compañías dedicadas a la extracción del petróleo, ya de registro galvanométrico, como los contruidos por el Príncipe B. Galitzin, y hasta hay un modelo del profesor Ambronn, en que el movimiento oscilatorio de la masa pendular hace variar la resistencia eléctrica del contacto de dos cuchillos de grafito, y, por tanto, la corriente de un circuito unido a ellos y mantenida por una batería de acumuladores.

Como se ha publicado una excelente descripción del sismógrafo de torsión Wood-Anderson, y en el notable tratado de D. José García Siliériz titulado *Los métodos geofísicos de prospección* se describen al detalle el sismógrafo de Ambronn, el de Mintrop, construido por Heyland, y el perfeccionado de Schweydar de dos componentes, creemos innecesario descender a pormenores de construcción y únicamente haremos brevísimas consideraciones acerca del registro del instante de la explosión y de la hora de los impulsos.

Dadas las poténtísimas amplificaciones que se necesitan en la prospección, el registro del sismograma ha de ser fotográfico. El aparato de relojería en que gira la banda inscriptora está en-

rrado en una caja que hace de cámara obscura ; a su lado hay una lamparita de 3 a 5 voltios, que facilita la luz que traza el sismograma, y parte de ella pasa a intervalos por la pequeña rendija de una plaquita unida a un péndulo, situado en el interior de dicha caja. De este modo, a más de la línea del sismograma, se marca otra paralela a ella, con trazos para indicar el tiempo y cuyos intervalos son de 0,07 segundos.

En el modelo Ambronn, cuyo peso total es de 9 kilogramos y de 150 gramos el de la masa pendular, el movimiento de la película inscriptora puede variar entre uno y diez decímetros por segundo, de modo que se aprecia perfectamente la media milésima de segundo.

Para obtener el tiempo de recorrido, que es el intervalo entre el instante de la explosión y el de su registro, hace falta que el primero se marque en la banda.

Para ello, en el aparato registrador hay un espejito en conexión con la armadura de un electroimán ; el rayo luminoso por aquél reflejado, marca en la banda una línea horizontal, mientras la corriente pasa por el electroimán ; al producirse la explosión, se interrumpe la corriente y la línea que trazaba el rayo luminoso queda cortada bruscamente ; su extremo marca exactamente el instante de la explosión, a partir del cual se cuenta el tiempo de recorrido correspondiente al impulso registrado en el sismograma.

Con tal objeto, el aparato registrador puede unirse por medio de un cable a la caja del explosivo, o a un aparato receptor, al que se transmite por «radio» el instante de la explosión.

Otro procedimiento se basa en transmitir una señal periódica y registrarla en la banda por medio de un oscilógrafo, colocado a igual distancia del péndulo que del aparato registrador, e interrumpir dicha señal en el instante de la explosión.

Por último, puede utilizarse el registro de las ondas sonoras producidas por la explosión, y como la distancia es conocida, deducir el instante de aquella ; este procedimiento exige, sin em-

bargo, conocer con exactitud la velocidad del sonido, lo que obliga a determinar la presión atmosférica, la temperatura y la dirección y velocidad del viento.

Como en la prospección sísmica se conoce el azimut del epicentro, los sismógrafos no necesitan más que registrar la componente vertical del movimiento y la horizontal en la dirección al punto de la explosión, y conocidas las amplitudes de ambas se halla inmediatamente el ángulo de emergencia.

En las gráficas de las explosiones, la prospección utiliza solamente la hora del impulso inicial. En las de los terremotos se estudian las de la llegada de las distintas clases de ondas: directas y reflejadas en la superficie terrestre y en la de discontinuidad de la masa del Globo: longitudinales, transversales y superficiales; los períodos, ángulos de emergencia, etc. Solamente el estudio, en los sismos próximos, de la primera superficie de discontinuidad, descubierta por el profesor yugoeslavo A. Mohorovičić, y que se halla a 57 kilómetros de profundidad, da origen a 22 ondas distintas.

Esta consideración hace comprender la extrema sencillez del problema de la prospección al lado del de la Sismología ordinaria. Claro está que la prospección está aún en sus comienzos; cuando se logre aumentar la energía de la explosión, o la ya considerable amplificación de los sismógrafos portátiles, habrá que considerar no sólo las ondas directas y longitudinales, sino también las reflejadas y las transversales, que en las gráficas actuales se marcan de modo apenas perceptible.

Es más, pueden citarse ya algunos ensayos aislados de prospección en que se han utilizado las ondas transversales y las longitudinales reflejadas en superficies de discontinuidad de profundidad pequeñísima. Así, en el glaciar alpino de Hintereisferner, Hans Mothes pudo estudiar la propagación de las ondas producidas por medio de explosiones con auxilio de dos sismógrafos (uno de componente vertical y otro microfónico); determinando

la velocidad de las ondas longitudinales y transversales que se transmitían por la masa del glaciar y las que se reflejaban en su base, pudo calcular su profundidad en un perfil de kilómetro y medio de longitud y comprobar que coincidía con los resultados obtenidos por el profesor H. Hess en sus reconocimientos y sondeos.

En la tesis doctoral de F. Hubert, discípulo del profesor E. Wiechert, se estudian las gráficas obtenidas en un sismógrafo por este último ideado, de registro fotográfico, período variable entre 0,2 y 0,04 segundos y de amplificación superior a dos millones de veces. Como la masa pendular de este sensibilísimo sismógrafo excede de cinco toneladas, no se trata de un instrumento portátil, como los de la prospección, sino de un péndulo instalado permanentemente en el Instituto Geofísico de Gotinga. Las horas de los impulsos se obtenían en milésimas de segundos, y los sismos artificiales eran producidos por la caída de pesos o por las explosiones de petardos en un punto situado a 125 metros de distancia.

En las explosiones utilizáronse cargas de pólvora negra de 110 gramos; en un experimento se enterró la carga a 70 centímetros; en otro se colocó en la superficie misma del suelo y en otro a dos metros encima de ella.

En la caída de pesos se hicieron, primero, estudios con pesos grandes de 20, 50 y 117 kilogramos; después con pesos más pequeños de 10, 5, 2, 1 y 0,5 kilogramos. Las alturas de caídas variaban entre 0,25 y 11 metros.

En las gráficas registradas, cuyas oscilaciones e impulsos se podían identificar perfectamente, uno a uno, en los distintos experimentos, se mostraron nueve impulsos, cuyos intervalos eran siempre los mismos, independientemente de las circunstancias exteriores: altura de caída y magnitud del peso, mayor o menor período con que el sismógrafo funcionaba, etc.

Hubert explicó este curioso resultado, suponiendo que los im-

pulsos eran debidos a reflexiones de las ondas sísmicas en las superficies de discontinuidad de las capas superiores de la corteza, es decir, en las superficies que separan los estratos de distinta formación o edad. La reflexión en una capa de sal que se supone existir en el subsuelo del observatorio se manifestaba de modo muy acentuado.

Las amplitudes de los diversos impulsos dependían de la altura de caída y magnitud del peso, o bien del punto en que el petardo hacía explosión, pues se demostró que la amplitud era de 50 a 100 veces mayor cuando la pequeña carga de pólvora negra estaba enterrada que cuando se colocaba en la superficie del suelo o a dos metros encima de ella. La menor amplitud correspondió a la caída de un peso de medio kilogramo desde una altura de 25 centímetros, y resultó ser de 16 cienmillonésimas de milímetro, es decir, del orden del diámetro de un átomo.

Las profundidades de los estratos del subsuelo en que se efectuaban las reflexiones, fueron calculadas por Hubert en 400, 600, 800—900 metros y 1, 2, 3, 4, 5 kilómetros, respectivamente.

Los estudios estratigráficos en las zonas inmediatas al lugar de observación permitían suponer la existencia de bancos del Muschelkalk, asentando sobre areniscas abigarradas, y éstas, a su vez, sobre estratos del Pérmico, con inclusiones de capas de sal, de edad anterior o posterior.

En los bancos del Muschelkalk, que constituyen las capas superficiales del Hainberg, en que asienta el Observatorio de Gotinga, cabe admitir la existencia de estratos correspondientes a los pisos superior, medio e inferior y que, por su diversa constitución, forman las superficies de discontinuidad que originan las reflexiones sísmicas. Por debajo de estos estratos calizos se hallarían las margas con espesor de 100 metros, y a las que seguirían las areniscas abigarradas.

Las capas de sal, por sus condiciones de densidad y elasticidad, que discrepan considerablemente de las suprayacentes, da-

rían lugar a una reflexión muy marcada, como indica el quinto impulso de las gráficas y su profundidad estaría a unos 800 a 900 metros, lo que está de acuerdo con los datos estratigráficos de las regiones inmediatas.

Vemos, pues, que con sismógrafos que amplifiquen dos millones de veces—y la construcción de tipos portátiles es cuestión de técnica que no ofrece grandes dificultades—se puede explorar una profundidad de 5 a 6 kilómetros y como, en realidad, los criaderos que estén a más de dos no son explotables, se puede asegurar que el problema de la prospección sísmica, en el caso de cuencas o estratos de poca inclinación, está resuelto de manera satisfactoria.

* * *

Pocas son las publicaciones que tratan de la interpretación de las gráficas debidas a explosiones. Parece ser que dadas las pequeñas distancias que se consideran, puede admitirse que el rayo sísmico es rectilíneo, hipótesis que es también muy aproximada en la Sismología ordinaria, tratándose de distancias que no excedan de doscientos kilómetros, es decir, que la influencia debida a la variación con la profundidad, de la densidad, presión, temperatura y módulos de elasticidad es despreciable o produce errores menores que los de observación.

Considerando sólo trayectos rectilíneos, la teoría de la interpretación de los sismogramas se establece fácilmente, partiendo de las leyes ópticas de la reflexión y refracción y del principio braquistocrónico. Las velocidades de las ondas sísmicas en las rocas que afloran en la zona explorada se obtienen por medición directa, las de las capas profundas por el trazado de la dromocrónica.

A juzgar por lo que se conoce de los trabajos de prospección se utiliza solamente la hora de llegada del impulso inicial, que

corresponde a las ondas longitudinales; restándole la hora de la explosión, o más bien, midiendo en la gráfica el intervalo entre ambas, se halla el tiempo de recorrido.

El dibujo de la dromocrónica se obtiene trazando un sistema de ejes coordenados rectangulares: en el horizontal se toman las distancias epicentrales y en el vertical los tiempos de recorrido: los puntos que corresponden a ambas coordenadas se unen por un trazo continuo. En el caso de la prospección las distancias epicentrales se eligen por el observador y pueden diferir muy poco unas de otras, lo cual permite el trazado, de la dromocrónica, con suma precisión.

En la imposibilidad de tratar, por falta de espacio, los distintos problemas que puede resolver la prospección sísmica, vamos a considerar solamente los dos más principales y que son de extraordinaria importancia en las aplicaciones: el cálculo de la profundidad de estratos horizontales de distinta constitución y la localización de fallas.

Consideremos primero el caso de dos estratos horizontales homogéneos, uno de distinta constitución que el otro, y que en el inferior sea mayor la velocidad de las ondas sísmicas, lo que ocurre de ordinario ya que ésta aumenta con la profundidad.

Si suponemos, por ejemplo, que la velocidad de las ondas longitudinales en el estrato superior es de 2.000 metros por segundo y de 4.000 en el inferior y que las estaciones estén situadas de doscientos en doscientos metros, es evidente que los tiempos de recorrido aumentarán de décima en décima de segundo, en tanto el rayo sísmico se propague solamente por el estrato superior. Los puntos de la dromocrónica que se obtengan para las estaciones más próximas estarán, pues, situados en una línea recta, y la cotangente del ángulo que ésta forme con el eje de distancias o abscisas dará el valor de la velocidad de las ondas sísmicas en el estrato superior.

Al aumentar la distancia epicentral llegará un instante en que

el rayo sísmico que se propaga en parte de su trayecto por el estrato inferior, donde es mayor la velocidad, y que sufre, por lo tanto, una doble refracción en la superficie de contacto de ambos estratos, llegará al mismo tiempo que el directo y que se transmite sólo por el estrato superior y a partir de la distancia epicentral en que esos dos rayos lleguen simultáneamente al lugar de observación, los tiempos de recorrido de este rayo doblemente refractado serán menores que los del directo y al primero corresponderán los impulsos iniciales del sismograma. Como la velocidad de las ondas en el estrato inferior es mayor, resultará que los tiempos de recorrido no crecerán como antes de décima en décima de segundo para cada doscientos metros, sino de media en media décima de segundo ya que la velocidad en el estrato inferior se ha supuesto doble.

La dromocrónica constará, pues, de dos líneas rectas que se cortarán en el punto a cuya distancia epicentral corresponde la llegada simultánea de los dos rayos. Este vértice o codo de la dromocrónica y la distancia epicentral correspondiente permiten determinar por una fórmula muy sencilla la profundidad de la superficie de separación de ambos estratos. También demuestra la teoría que el segundo segmento de la dromocrónica forma con el eje de las distancias un ángulo cuya cotangente es el valor de la velocidad de las ondas sísmicas en el estrato inferior.

Si variamos la posición del punto de explosión, la dromocrónica no cambiará y su codo continuará a igual distancia del origen.

En el caso de estar el subsuelo formado por más de dos estratos horizontales de distinta constitución, los razonamientos anteriores pueden generalizarse y la dromocrónica será una línea quebrada de tantos vértices o codos como estratos se consideren. La inclinación de cada lado de la línea poligonal permitirá calcular la velocidad de las ondas sísmicas en los estratos correspondientes y la potencia de éstos se determinará fácilmente por la posición en la dromocrónica de los codos respectivos.

En el caso de que la superficie de separación de dos estratos sea plana, pero no horizontal, no basta para determinar su posición e inclinación la explosión hecha en un solo punto. Hay dos procedimientos para resolver el problema: o bien dejar invariables la posición de las estaciones y hacer explosión en dos puntos distintos, o cambiar mutuamente la posición del punto de explosión y el de la estación registradora. Las fórmulas son algo más complicadas pero el problema se resuelve sin grandes dificultades.

En general, para estudiar la estructura geológica de una región basta considerar el caso de superficies planas en la separación de los estratos: de ser éstas curvas, las ecuaciones son más complicadas, y es preferible deducir la dromocrónica por una construcción geométrica del rayo sísmico, basada en las leyes de la refracción.

Los perfiles irregulares de estructuras geológicas pueden, pues, obtenerse por combinación de partes rectilíneas. En el caso de estratos con un cierto buzamiento (flancos de sinclinales y anticlinales) las fórmulas pueden aplicarse y determinar la profundidad a que éstos alcanzan, si los perfiles se efectúan en la dirección de las capas y el eje del sinclinal o anticlinal es horizontal aproximadamente.

Combinando hábilmente los perfiles sísmicos que se efectúan en la zona explorada, cabe determinar la profundidad en cada punto de una cierta formación o estrato y hacer el plano subterráneo correspondiente, en que las curvas de nivel en lugar de indicar altitudes expresarán profundidades.

La determinación de la velocidad de las ondas sísmicas en cada estrato por el ángulo de inclinación de la dromocrónica tiene especial importancia; por ejemplo, para averiguar si existe una capa carbonífera o potásica a la que corresponde una velocidad conocida de las ondas sísmicas, bastará observar un perfil en la dirección que se quiera explorar, y comprobar por el

trazado de la dromocrónica, si algún segmento de ella tiene la inclinación que corresponde a dicha velocidad: en caso afirmativo se podrá determinar la profundidad a que esté la capa, dato fundamental que decide la posibilidad de la explotación minera.

Así, por ejemplo, en la prospección efectuada por el Instituto Geológico y Minero en la zona de Villanueva de las Minas, el problema fundamental es averiguar si existe la capa carbonífera, en la que la velocidad de las ondas sísmicas longitudinales varía entre 3.100 y 3.700 metros por segundo. Como la que corresponde a los demás estratos (aluvial, mioceno y cambriano), es muy distinta de ésta, pues para el primero es de 500 a 800 metros, para el segundo de 1.800 a 2.100 y para el tercero de 4.200 a 5.500, los perfiles acusan perfectamente por la inclinación de los lados de la dromocrónica donde falta la capa hullera, y, si existe, la posición del codo respectivo indica su profundidad y potencia. No puede darse resultado más preciso y útil para la explotación minera.

* * *

Consideremos ahora el caso de una falla vertical, con salto, que pone en contacto dos formaciones o estratos de muy distinta constitución y, por tanto, en que la velocidad de las ondas sísmicas es diferente. Efectuando un perfil en dirección normal a la de la falla, se comprende fácilmente que si, por ejemplo, el punto de explosión y las estaciones más próximas están a la izquierda de la falla, la dromocrónica de las ondas longitudinales directas para el grupo de dichas estaciones tendrá una cierta inclinación, correspondiente a la velocidad de las ondas sísmicas en el estrato situado a la izquierda de la falla, en tanto que la dromocrónica correspondiente a las estaciones situadas a la derecha tendrá otra inclinación que corresponderá a la mayor o menor velocidad de las ondas sísmicas en esa región, por lo tanto, la dromocrónica

esará constituida por un ángulo cuyo vértice o codo corresponderá a la posición de la falla. Si dejando invariable la posición de las Estaciones, cambiamos el punto de explosión, la distancia del codo de la dromocrónica será ahora distinta, ya que el codo seguirá situado sobre la falla, en tanto que el origen (punto de explosión), ha variado.

Vemos, pues, que si la dromocrónica es un ángulo, para saber si la estructura subterránea corresponde a la superposición de dos estratos horizontales, o a una falla, no habrá más que efectuar otra explosión y comprobar si el codo sigue o no a igual distancia del origen.

La existencia de la falla se puede deducir aún desconociendo en absoluto los datos geológicos de la zona explorada, y es claro también que si la dromocrónica, después de prolongar un perfil, es sólo una línea recta no habrá perturbación alguna en el subsuelo, y por lo tanto, no habrá superficie de discontinuidad que pueda determinarse sísmicamente.

Cuando el sismógrafo empleado en la prospección registra las dos componentes del movimiento, es fácil deducir el ángulo aparente de emergencia, cuya tangente es igual a la relación entre la amplitud vertical y la horizontal. La consideración de este ángulo es de importancia en los problemas de la reflexión de las ondas sísmicas en la superficie del suelo y en las de discontinuidad del subsuelo. Si se tiene en cuenta que al atravesar una de estas la onda incidente puede dar lugar a otras cuatro, dos refractadas y dos reflejadas (una longitudinal y otra transversal), se comprenderá la extrema complicación del trazado de los sismogramas y que en la prospección se atienda exclusivamente al impulso inicial, correspondiente a las ondas longitudinales, que son las más veloces.

Otra complicación es que ciertos estratos pueden entrar en su propia vibración al pasar las ondas sísmicas, y transmitir a la superficie del suelo las vibraciones en ellos provocadas.

Es de mucha importancia saber en qué problemas geológicos habrían de aplicarse las fórmulas derivadas de las leyes de la refracción o las que corresponden a las vibraciones propias de los estratos. La distinción sólo es posible estudiando los ángulos de emergencia y los períodos registrados de las ondas sísmicas.

En el caso de dos estratos superpuestos, cabe imaginar que las vibraciones propias se provoquen en el estrato superior o inferior. Por ambos supuestos puede explicarse que los ángulos de emergencia registrados no correspondan a las leyes de la refracción. En el caso de unas investigaciones de Schweydar en un glaciar, Heiland se inclina a creer en la existencia de las vibraciones de la capa de hielo y no de la roca infrayacente, basándose en el hecho observado por Schweydar de que el período de las ondas sísmicas variaba según el espesor del glaciar.

* * *

Como complemento de lo que acaba de exponerse vamos a hacer una breve reseña de los trabajos de prospección sísmica efectuados en España por su Instituto Geológico y Minero, y de los resultados obtenidos.

La primera investigación se llevó a cabo en la región N.E. de la meseta terciaria de Madrid para determinar la profundidad de la cuenca cretácea infrayacente, que contiene aguas artesianas, y saber a qué profundidad se encontraría en el sondeo que había de practicarse en Alcalá de Henares. Este trabajo de prospección sísmica, que nosotros sepamos, es el que ha alcanzado mayor profundidad de todos los efectuados en los distintos países. En él se observaron 13 perfiles sísmicos, con 166 estaciones y 90 kilómetros de longitud, lo que da un promedio por perfil de 7 kilómetros, y siete perfiles cortos para determinar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en los estratos superficiales.

La longitud extraordinaria de estos perfiles se explica porque se trataba de explorar capas situadas a gran profundidad.

Como con una sola explosión y estación de los sismógrafos no se podía efectuar un perfil de 7 kilómetros de longitud y aún de 10 en uno de ellos, había que prolongarlos en la alineación elegida, variando la posición de las estaciones y repitiendo las explosiones. En lugar de colocar los segmentos del perfil, unos a continuación de otros, se prefirió que cada uno de ellos tuviera una parte común con el anterior; de este modo se comprobaban las profundidades obtenidas y se podía seguir paso a paso la capa explorada, sin el riesgo de confundirla con otra.

La cantidad de dinamita de cada explosión varía según los sismógrafos que se empleen. En los del tipo Mintrop puede calcularse una caja de 25 kilogramos por cada kilómetro de distancia entre el barreno y el sismógrafo. Si se emplean los de tipo Ambronn, puede disminuirse la carga considerablemente, pero la necesidad de los cables limita mucho la longitud del perfil.

Como ejemplo aclaratorio damos las cifras correspondientes al perfil número 2. Se empezó por emplear un solo sismógrafo modelo Mintrop, a las distancias del barreno de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 metros; las cargas respectivas variaron entre 50 y 380 gramos de dinamita. Después se colocaron 4 sismógrafos a las distancias de 500, 800, 1.100 y 1.500 metros, respectivamente, y la explosión se efectuó con una caja de 25 kilogramos de dinamita. Luego se situaron los sismógrafos a las distancias de 2.085, 2.720, 3.200 y 4.000 metros y se cargó el barreno con 100 kilogramos de dinamita. El último segmento corresponde a las distancias de los sismógrafos de 4.955, 5.505, 6.380 y 7.250 metros y la carga fué de 175 kilogramos. Esas distancias de los sismógrafos, al prolongar los perfiles, se eligen de modo que los diversos lados de la dromocrónica pasen por puntos determinados en el segmento anterior con el objeto de que los codos se fijen con toda seguridad, ya que de su posición depende el valor de

la profundidad de los estratos y la velocidad en ellos de las ondas sísmicas.

Por el trazado de las cromocrónicas se hallaron en la investigación efectuada en la zona de Alcalá de Henares cuatro velocidades de las ondas longitudinales de 1.600, 2.051, 3.124 y 4.886 metros por segundo. La primera corresponde a la cubierta detrítica y la segunda y tercera al terciario propiamente dicho. El aumento de velocidad con la profundidad se explica por la mayor cantidad de caliza y yeso que contienen las capas inferiores. Por último la cuarta velocidad de 4.886 metros por segundo corresponde ya a la caliza cretácea buscada.

Las potencias de estas tres capas resultaron ser de 4, 250 y 1.500 metros respectivamente.

La segunda investigación del Instituto Geológico y Minero de España se efectuó en la cuenca carbonífera de Villanueva de las Minas en una zona de 24 kilómetros cuadrados, reservada para el Estado, que contiene los pueblos de Villanueva y Alcolea del Río, de la provincia de Sevilla, a orillas del Guadalquivir. Al Norte de esta zona se encuentra Villanueva de las Minas, donde radican las importantes explotaciones hulleras de la Reunión.

A la altura de esta población los afloramientos carboníferos y cambrianos desaparecen bajo los sedimentos miocenos. Se conoce muy bien la cuenca hullera hasta el límite S. E. de la explotación actual: el flanco E. del sinclinal ha sido fijado por las labores mineras hasta unos 400 metros de la zona reservada para el Estado. En el flanco Oeste los avances de las galerías apenas han llegado a 300 metros al Sur del pozo número 8.

Cuantos sondeos se han efectuado hasta ahora para encontrar la prolongación de la cuenca hullera no han dado resultado alguno, ni ha sido posible deducir la estructura tectónica de esta dislocada zona, que se halla en la unión de dos sistemas de fallas: las originadas por el hundimiento de la región del Guadalquivir y las producidas por el de la fosa del Viar, hasta ahora descono-

cidas, pues han sido descubiertas por la prospección. El objeto de ésta era limitar la cuenca hullera y descubrir las condiciones tectónicas del subsuelo para averiguar dónde podían encontrarse las capas hulleras, que son continuación de las explotadas en dichas minas.

En el trabajo de prospección que estamos tratando, se emplearon los cuatro métodos y los resultados de sus observaciones, acertadamente combinados, permitieron llegar a interesantes conclusiones acerca del problema enunciado.

El método sísmico se empleó muy ventajosamente, pues sus condiciones principales de estar los estratos horizontales o ligeramente inclinados y presentar grandes diferencias de densidad y elasticidad se cumplían perfectamente en la región de Villanueva de las Minas. Las capas cambrianas, de pizarras filíticas, con intrusiones de diabasa, forman el fondo del sinclinal y las ondas sísmicas longitudinales se propagan por ellas a una velocidad que oscila entre 4.200 y 5.500 metros por segundo. La formación carbonífera que rellena el sinclinal, consta de pudingas, pizarras, areniscas y brechas; la velocidad en ellas de dichas ondas varía entre 3.100 y 3.700 metros por segundo.

Constituyen la parte superior las capas miocenas de arenas y margas, con bancos de débil espesor de restos de *Ostreas* y arenas empastados con un cemento calizo. En estas capas terciarias, las ondas sísmicas longitudinales se propagan con velocidades comprendidas entre 1.800 y 2.100 metros por segundo, exceptuando los bancos calizos, que por su pequeño espesor no ejercen influencia apreciable.

Por último, en algunas partes de la zona se hallan capas aluviales, compuestas de guijarros, arenas y arcillas, a las que corresponden las velocidades sísmicas de 500 a 800 metros.

La determinación directa de dichas velocidades en las cuatro formaciones citadas, se pudo efectuar fácilmente, por medio de dos perfiles preliminares, ya que en la región septentrional afloraban el carbonífero y el cambriano.

Sentados estos antecedentes, la prospección se efectuó por medio de 19 perfiles, once en la zona Norte y ocho en la Sur del Guadalquivir. Trazadas las dromocrónicas correspondientes a los diversos perfiles, los segmentos rectilíneos determinaron por su inclinación las velocidades de las ondas sísmicas longitudinales en las cuatro formaciones aluvial, miocena, carbonífera y cambriana y la posición de los codos la potencia de cada uno de los estratos.

De este modo puede seguirse el borde N. E. del sinclinal en un recorrido de 1.500 metros próximamente hasta el puente del Galapagar, en la carretera de Lora del Río, donde queda cortado por una importante falla, la de Galapagar, en relación con un sistema de fracturas más o menos paralelas y continuas. El borde SW. se sigue perfectamente y antes de llegar a la zona reservada para el Estado, queda cortado por la falla de Villanueva del Río. La prospección ha permitido también encontrar en la parte occidental de aquélla otro sistema de importantes fallas paralelas de dirección NW.-SE, la más occidental de las cuales pasa por la población de Tocina, y estudiar el buzamiento y salto de las fallas principales y las condiciones tectónicas de los bloques o compartimientos por ellas separados.

La última investigación de que hemos de dar cuenta, es el trabajo del Instituto Geológico (*), contratado con la Sociedad Anónima «Fodina», para determinar la extensión, profundidad y potencia del yacimiento salino, que se supone existir en sus concesiones α , β y Xi, situadas en la cuenca potásica catalana.

La región es muy extensa y comprende las dos zonas de Suria

(*) Este trabajo se ha efectuado recientemente, y sus resultados no se han publicado todavía. Agradecemos profundamente al ilustre Director del Instituto, Excmo. Sr. D. Luis de la Peña, el que nos haya permitido consultar la notable *Memoria* presentada por el Ingeniero D. José García Sieniz, Jefe de la Sección Geofísica, que ha efectuado dicho trabajo de prospección.

y Balsareny. Como el trabajo estipulado era sólo de 40 kilómetros de perfiles sísmicos, no pudo efectuarse más que un estudio general, con estaciones situadas próximamente a 500 metros unas de otras.

Siendo la profundidad del techo de la sal en los sondeos efectuados en las zonas inmediatas de 500 a 800 metros, la longitud media de los perfiles se eligió de 4 kilómetros, y su dirección en coincidencia con la de los ejes de los sinclinales y anticlinales.

El trabajo de prospección se efectuó únicamente por el método sísmico, pues la estructura geológica así lo recomendaba. La estratificación de las capas es casi horizontal en grandes extensiones y la velocidad de las ondas sísmicas va aumentando con la profundidad, pues se encuentran de arriba a abajo: areniscas, margas silíceas, margas calizas, anhidrita y la importante capa de sal, cuya potencia llega, y excede a veces, de 500 metros.

Se observaron en total, once perfiles sísmicos, tres en la zona de Balsareny y ocho en la de Suria. En todos ellos el banco salino se manifiesta por la velocidad de las ondas sísmicas, que es de unos 5.500 metros por segundo, y difiere considerablemente de la de las capas suprayacentes. En las areniscas alcanza unos 2.500 metros: las margas presentan velocidades que varían entre 4.000 y 4.800 metros, según su composición más o menos caliza y las intercalaciones yesosas: al cortar el rayo sísmico el muro de la sal, la velocidad de 5.500 metros desciende bruscamente a 4.000 ó 4.100, que corresponde a las margas.

En todos los perfiles se determina con precisión la profundidad del techo de la sal y el espesor de ésta y con los datos de las potencias de los diversos estratos se han podido trazar perfiles geológicos, que dan perfecta idea de la estructura subterránea.

En cuanto a la exactitud de las profundidades calculadas por las dromocrónicas, apuntaremos el siguiente dato: en el perfil número IX el cálculo dió el techo de la sal a 669 metros de profundidad y el sondeo allí efectuado lo cortó a 674. El cálculo dió para

el muro de la misma la profundidad de 807, y el sondeo lo halló a 810.

La línea dromocrónica del perfil número XI es muy interesante, porque pone de manifiesto la existencia de la sal en la región de Sampedor y la del perfil X fija la situación de una falla, que el rayo sísmico atraviesa en su trayecto ascendente y descendente.

Terminado el trabajo de prospección y efectuado el cálculo de profundidades y potencias de los estratos, así como el trazado de los cortes geológicos, se ha llevado a cabo un sondeo en Sallent, que ha cortado la potasa a la profundidad de 350 metros: como la que resulta de los perfiles IX y X es casi exactamente la misma, el éxito de este trabajo de prospección del Instituto Geológico merece las más calurosas felicitaciones.

* * *

Por falta de tiempo hemos tratado únicamente del método sísmico de prospección, que sólo en casos excepcionales, como el de la investigación de Suria, será por sí mismo suficiente para resolver el problema planteado. En general, la prospección obliga a emplear a la vez varios o todos los procedimientos: cada uno de ellos presenta ventajas especiales y requiere ciertas condiciones, pero es un auxiliar valioso de los demás y un acertado empleo combinado de todos ellos, es quizá el medio más rápido y seguro de obtener en la prospección resultados satisfactorios.

El método gravimétrico requiere terreno llano o ligeramente ondulado, en que sea apreciable la diferencia de densidad entre la masa buscada y las rocas circundantes y determina con precisión las fallas, anticlinales y sinclinales. El magnético se aplica a la investigación de los minerales magnéticos de hierro y de masas salinas muy extensas. El eléctrico de corriente continua exige que las capas superiores del terreno no sean muy buenas conduc-

toras de la corriente : con él se puede estudiar una cuenca sedimentaria o filón metálico, si la profundidad no excede de 500 a 600 metros.

Por la polarización espontánea o provocada se descubren las masas de pirita o filones a ellas asociados y los métodos electromagnéticos se usan en las mismas condiciones, aunque son de aplicación más restringida y dan sólo indicaciones relativas. Por último, el método sísmico sirve para estudiar una cuenca sedimentaria, cuando los estratos no están muy inclinados y tiene la ventaja de poder explorar las capas más profundas.

Como se ve por la breve reseña que antecede, la labor de prospección geofísica efectuada en España es de gran interés y promete resultados de importancia. El Instituto Geológico y Minero, encargado en el Congreso internacional de Madrid, de la dirección de una Sección de Geofísica aplicada a los problemas geológico-tectónicos y mineros, ha respondido brillantemente al honor conferido creando el Laboratorio geofísico y aplicando todos los procedimientos de prospección a la exploración de nuestras zonas mineras, para contrastar la eficacia de éstos, y comprobarlos con ulteriores sondeos.

Cualquiera que sea el porvenir que aguarde a los novísimos procedimientos de prospección, no hay duda que el camino que lleva a su perfección es el seguido por nuestro Instituto Geológico, al estudiarlos de un modo sistemático y en gran escala para contrastar con la mayor eficacia las diversas teorías y fórmulas.

Al erigirse en defensor entusiasta de la Geofísica aplicada, el Instituto Geológico español toma una generosa iniciativa de gran valor, si se tiene en cuenta el escepticismo con que hace poco se juzgaban estos novísimos y misteriosos procedimientos, cuyas promesas—acaso exageradas—despertaban recelos entre los Geólogos.

Que nuestra labor geofísica se aprecia en grado suma por los extranjeros, pruébalo el hecho—muy honroso para nuestra pa-

tria—de que en el último Congreso internacional de Geología, celebrado en Pretoria (Africa del Sur) en Agosto de 1929 el señor García Sñeriz fuera nombrado Presidente de la Sección internacional de Geofísica aplicada y recibiera los plácemes de eminentes Geólogos por su tratado «Los métodos geofísicos de prospección» que acababa de publicarse.

Dos años antes y en la tercera Asamblea general de la Unión internacional Geodésica y Geofísica, celebrada en Praga (Septiembre de 1927), otro español, el Ingeniero Geógrafo D. Rodrigo Gil, había sido nombrado por la Sección de Magnetismo, Presidente de una Comisión internacional, creada a iniciativa suya, para la aplicación de la Geofísica, al mismo tiempo que se elogiaba unánimemente el Mapa magnético español, efectuado por el Instituto Geográfico Catastral y cuya época fué elegida como inicial, para los de los demás países.

En la cuarta Asamblea general, que acaba de celebrarse en Estocolmo, los trabajos del Instituto Geológico y Minero, que expuso en brillante conferencia el Ingeniero geógrafo y de Minas, Sr. García Sñeriz, fueron objeto de grandes elogios.

Estos testimonios de aprecio internacional deben alentarnos a continuar tan útiles investigaciones geofísicas y si el Geólogo del porvenir abandona de cuando en cuando el martillo, que explora las rocas superficiales, y recurre a la dinamita para provocar temblores artificiales, es que ha encontrado en el rayo sísmico la varita mágica, que hace transparente la corteza terrestre y escruta sus capas profundas para buscar en ellas los tesoros minerales, que han aguardado tantos siglos a que el hombre llegara a conquistarlos.

El sismólogo no quiere, sin embargo, envanecerse de su triunfo y contestar a la maliciosa pregunta del hombre práctico, diciendo que son útiles y muy útiles las lucubraciones sismológicas: la ciencia no se preocupa de ciertas apreciaciones y avanza majestuosa en su camino de progreso, guiada siempre por ese noble

impulso de la inteligencia humana que la lleva a buscar la causa de tantos misteriosos fenómenos telúricos y dando a veces con los descubrimientos de gran alcance práctico, en esa lucha armónica que establece el equilibrio entre el ideal altruista y el lucro egoísta, misterioso dualismo que alcanzó su expresión más sublime en la obra inmortal de Cervantes, cuyo fecundo contraste entre Don Quijote y Sancho, han hecho de ella la creación humana más perfecta, para gloria de España y de sus letras.