

ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

---

# DISCURSO

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN

POR EL

SR. D. JOSÉ GARCÍA SIÑERÍZ

Y

# CONTESTACION

DEL EXCMO. SEÑOR

D. ENRIQUE HAUSER Y NEUBURGER

EL DÍA 9 DE ENERO DE 1935



MADRID

C. BERMEJO, IMPRESOR  
Santísima Trinidad, 7. - Telef. 31190

1935

DISCURSO

DE

D. JOSÉ GARCÍA SIÑERÍZ

SEÑORES ACADÉMICOS:

TAN grande es mi agradecimiento al honor que me concede la más alta representación de la Ciencia en España, llamándome a su seno, como son escasos mis méritos para justificar tan señalada distinción. Procuraré ser digno de ella, poniendo al servicio de tan docta Casa mis modestas facultades intelectuales, con el vehemente deseo de servirla fielmente.

Muy difícil, casi imposible, va a ser para mí llenar el vacío que dejó mi insigne antecesor D. José M. de Madariaga, cuyos méritos científicos y cualidades personales fueron tan superiores a las mías, que considero como un honor máximo haber llegado a ser por los azares de la suerte el sucesor de tan venerado maestro.

\* \* \*

No considero necesario exponer una reseña biográfica completa de tan excelso varón, por haberlo ya efectuado otras notables personalidades en la sesión necrológica celebrada en su honor, el día 3 de abril del corriente año, en la Escuela Especial de Ingenieros de Minas (1).

---

(1) *Revista Minera y Metalúrgica*, núm. 3-403.

Solamente resumiré los rasgos más salientes de aquélla, para rendirle el tributo de admiración que le profesé, desde hace más de treinta años, y de agradecimiento por las múltiples pruebas de afecto que constantemente me daba.

Los comienzos de su carrera de Ingeniero de Minas, desde el año 1879 al 1886, se desarrollan en las minas de Almadén, donde estuvo encargado de la Sección de Beneficio. Su paso por aquel Establecimiento se señala en los múltiples perfeccionamientos que introdujo en la preparación de la carga de los hornos y en la utilización de los combustibles empleados.

Después de muchos ensayos construyó los hornos de marcha continua, que han estado en servicio hasta los primeros años del siglo actual.

El año 1886, cuando contaba treinta y tres años de edad, se incorpora al Laboratorio de la Escuela de Minas, donde realiza innumerables trabajos de ensayos y análisis, construyendo en el Laboratorio Gómez Pardo un horno doble de mufla que aún se conserva. Más tarde, en unión del insigne Hauser, proyecta e inaugura para la ejecución simultánea de varios ensayos por electrolisis, una modificación de la mesa tipo Classen, que ellos mismos construyeron.

Después de un incesante trabajo de Laboratorio durante cinco años, fué destinado a la Escuela de Minas para explicar la cátedra de Electrotecnia, creada para él, y que fué la primera de España que estudió a fondo todos los problemas de esta ciencia.

Durante veintitrés años consecutivos, hasta 1913, explicó su cátedra, ante otras tantas generaciones de ingenieros, de las que han salido las más preclaras figuras de la industria eléctrica española, entre las que citaremos algunas como Urrutia, Cerero, Pérez-Cossio y Orueta, entre los ingenieros de Minas; Orbegozo, Echarte y Sánchez Cuervo, entre los de Caminos; Bustamante,

entre los Agrónomos; Armenteras, entre los de Montes; Ugarte, entre los ingenieros Militares, etc., etc.

Simultáneamente a su labor en la cátedra, escribió innumerables trabajos, publicados en las principales revistas científicas de su época.

También pronunció muchas conferencias, entre las que destacan las que explicó en el curso de estudios superiores, sobre Electroestática, Magnetismo y Electromagnetismo, organizado por el Ateneo de Madrid, durante los años 1907 y 1908.

Pasada la mitad próximamente de su vida de profesorado, ingresó en esta Academia el año 1902, donde realizó una enorme labor en que destaca su espíritu delicado y austero y desempeñó el cargo de Secretario desde el año 1920 hasta su muerte, sin apenas abandonar su abrumador trabajo, no obstante los sufrimientos que padecía a causa de una grave enfermedad, que sobrellevaba calladamente.

Fué Director de la Escuela de Minas, Presidente del Consejo de Minería, Vocal nato de la Comisión española permanente de electricidad, etc., etc.

Dedicó una buena parte de su vida a hacer obras de caridad, y murió cristianamente el día 29 de enero del corriente año.

En estos solemnes instantes, rindo con verdadera emoción el más ferviente homenaje de cariño, admiración y respeto al recuerde de mi querido amigo y sabio maestro.

Una vez cumplido este deber, o al menos con el deseo de haberlo efectuado, voy a presentaros un modesto trabajo sobre “La Geofísica aplicada a la Prospección”, que he elegido como tema de mi discurso en este día memorable de mi vida.

El tema es arduo y está erizado de dificultades, algunas imposibles de vencer en el actual estado de la minería. Sin embargo, los brillantes resultados obtenidos por los investigadores de la

Geofísica aplicada, nos han hecho sentir el deseo de profundizar en estos conocimientos, para contribuir a vencerlas en la medida de nuestras fuerzas, guiados por un puro afán científico a la vez que patriótico, si se considera la enorme importancia que tiene para la economía nacional la aplicación práctica de esta clase de investigaciones.

\* \* \*

Los métodos geofísicos de prospección constituyen un instrumento de la Geología aplicada, cuyos éxitos se deben a los progresos realizados en las ciencias que la han precedido, como la Sismología, Electrotecnia, etc., y cuyas principales ventajas sobre los demás sistemas geológicos estriban en su rapidez y economía.

Para darnos cuenta de su importancia práctica, citaremos uno de los resultados obtenidos en los EE. UU.

Según la obra de Donald C. Barton, *Geophysical Prospecting*, 1929, a partir del descubrimiento del primer domo salino, en *Texas* y *Louisiana*, el año 1919, se hicieron en aquella región durante cinco años, 765 sondeos, con un costo total de veinte millones de dólares y cuyo resultado, de encontrar un solo domo más, fué bien pobre por cierto.

A partir del año 1924, se empezaron a aplicar sistemáticamente los métodos geofísicos de prospección, y su resultado ha sido la determinación de 60 domos, con un gasto total de 30 millones de dólares.

La superficie reconocida ha sido de 300.000 kilómetros cuadrados. Para investigarla por medio de sondeos, hubiera sido preciso perforar unos 30.000, y su coste hubiera excedido de un billón de dólares.

Las diferentes rocas que forman la parte exterior de la corteza terrestre, difieren entre sí por alguna de sus propiedades físi-

cas, tales como la densidad, susceptibilidad magnética, conductibilidad eléctrica o sísmica, etc.

Los métodos geofísicos de prospección estudian por observación directa las variaciones de estas propiedades en una extensión superficial limitada, para deducir de ellas la existencia de los minerales, rocas o accidentes geológicos que las han producido.

Su aplicación exige efectuar una serie sistemática de medidas del parámetro físico que se trata de aprovechar para la resolución del problema. Todas ellas no están observadas en las mismas condiciones de temperatura, hora, relieve topográfico, etc., y de aquí que para hacerlas comparables entre sí sea preciso, en muchos casos, efectuar correcciones, que pueden ser de gran importancia.

Así, obtenemos las *variaciones corregidas*.

Para conocer la influencia propia del subsuelo y de su estructura, en las variaciones corregidas, hay que compararlas con las llamadas *normales* (que serían las observadas en un suelo homogéneo e isótropo) y deducir las diferencias o *anomalías*.

Así, obtenemos un cuadro numérico de anomalías o una representación gráfica de las mismas, que sirve para *interpretar geológicamente los resultados* de las mediciones.

Esta interpretación es, a veces, la parte más difícil del problema. No basta la colaboración del físico habilísimo, del eminente matemático y del sabio geólogo para lograr la solución exacta. Es más ventajoso que una sola persona adquiera un nivel medio de conocimientos en cada una de las ciencias citadas y cuyo buen sentido le permita ponderar debidamente la influencia correspondiente a cada uno de los factores de orden matemático, físico o geológico, que en la investigación intervienen.

A continuación haremos una breve reseña de los métodos geofísicos de prospección más importantes y de sus principales aplicaciones.

\* \* \*

Entre dichos métodos podemos distinguir dos grupos: el que estudia los campos naturales de fuerza y el que se refiere a los producidos artificialmente. Entre los primeros se encuentran:

El método gravimétrico.

El método magnético.

El método eléctrico de polarización espontánea.

El método radioactivo.

Entre los segundos podemos citar:

El método sísmico.

El método eléctrico.

El *método gravimétrico* estudia las variaciones del campo de la gravedad, por medio del aparato ideado y construido por Eötvös, llamado balanza de torsión, que permite medir los gradientes máximos horizontales y las magnitudes que nos determinan las superficies de nivel gravimétrico o gravitatorio, en unidades del noveno orden decimal del sistema C. G. S.

En principio, la balanza de torsión consta de un hilo de platino iridiado del que pende una varilla, colocada perpendicularmente y contrapesada en sus extremos. Uno de los contrapesos no está colocado directamente en el extremo de la varilla, sino suspendido de ella por un hilo de latón.

Si las fuerzas de la gravedad son iguales y paralelas en las cercanías de la balanza, no se producirá ninguna desviación en el brazo de la misma, cualquiera que sea la orientación que se le dé.

Lo mismo sucederá en el caso de ser esféricas las superficies de nivel.

En los demás casos, su acción total sobre el instrumento es equivalente a la de una fuerza única que actúe sobre el centro de gravedad y que se contrarresta con la tensión del hilo y a la de un par cuyo plano es perpendicular a la primera y que produce el giro del brazo hasta equilibrar la torsión en aquél producida.

La medición de este ángulo de giro en cinco posiciones distintas nos permite calcular las magnitudes gravílicas, por medio de las fórmulas publicadas por Eötvös en su obra *Bestimmung der Gradienten der Schwerkraft und Niveau flächen mit Hülfe der Drehwaage*.

Así, obtenemos los valores del gradiente máximo horizontal y los de los llamados términos de curvatura, que después de ser sometidos a las correcciones debidas a la acción de las masas superficiales (topografía del terreno) y la del campo gravitatorio normal, nos suministran las anomalías que sirven para la interpretación geológica de los resultados.

Este método se aplica con éxito completo en la determinación de los sinclinales, anticlinales y fallas, de las estructuras geológicas ocultas por sedimentaciones horizontales o con pequeña pendiente.

El *método magnético* se funda en la medición de las variaciones relativas de las anomalías locales de los elementos magnéticos terrestres.

Los progresos realizados recientemente para eliminar la influencia de la temperatura en los variómetros magnéticos, han conseguido que este método de prospección dé muy buenos resultados en la investigación de los minerales magnéticos, aun cuando sólo lo sean en un pequeño grado.

Los aparatos que se emplean son los variómetros de la componente vertical y horizontal del campo terrestre. Las mediciones suministran solamente variaciones relativas que hay que someter a diversas correcciones, antes de llegar a los valores definitivos que han de interpretarse geológicamente.

El *método eléctrico de polarización espontánea* se aplica a los yacimientos que presentan naturalmente esta propiedad. Algunos yacimientos metalíferos producen una corriente eléctrica que circu-

la por el suelo, como si se tratase de una pila natural. Entonces se dice que la región presenta la *polarización espontánea*.

Para que exista la polarización espontánea es preciso que el yacimiento presente la conductibilidad metálica en una cierta altura, para lo que es indispensable una rigurosa continuidad de los cristales del mineral, sin interposición de gangas y que su naturaleza sea apropiada a la producción del fenómeno eléctrico que consideramos.

También se necesita que el electrólito presente una cierta disimetría entre sus partes superior e inferior, condición que se verificará cuando aquélla esté encima del nivel hidrostático.

La oxidabilidad del mineral constitutivo del yacimiento favorece la producción de la corriente, tanto por la energía eléctrica que produce como por la absorción del hidrógeno naciente, que actúa de despolarizante de la pila natural existente en el terreno.

La polarización espontánea se manifiesta en las *masas de pirita*, aún asociadas a otros minerales; en los *sulfuros de cobre*; en las *antracitas* y en el *grafito*, que reúne todas las condiciones necesarias por ser muy conductor, muy oxidable y presentarse en capas continuas.

El *método radioactivo* se emplea para descubrir los yacimientos de radio, los manantiales de aguas radioactivas y las fallas y fracturas recubiertas por un ligero espesor de terrenos muertos.

Al desintegrarse una sustancia radioactiva emite radiaciones, y en algunas de ellas da nacimiento a un gas, también radioactivo. Entre los rayos emitidos, algunos pertenecen a la serie de los rayos  $\gamma$ , que tienen un poder de penetración suficiente para atravesar algunos metros de terrenos de recubrimiento. El gas radioactivo emitido, recibe el nombre de *emanación*, sin que nos interese más que la que procede del radio o *radón*, que se encuentra en cantidades bastante grandes en muchos manantiales minerales.

Al desintegrarse el radón produce una nueva radiación y el gas inerte *helio*. Así se explica que una cierta cantidad de radón encerrada en una ampolla de vidrio se reduzca a la mitad, en un plazo algo menor de cuatro días.

El gas que procede de un mineral radioactivo situado en el subsuelo, atraviesa éste por difusión hasta llegar a la atmósfera. La cantidad que pasa en un segundo por la superficie de un centímetro cuadrado del suelo, se llama *flujo de emanación*. La medida de este flujo se reemplaza en la práctica por la de la cantidad de radón contenida en un volumen constante de aire extraído del subsuelo a un metro debajo de la superficie.

La unidad de medida es el *Curie*, que es la emanación correspondiente a un gramo de radio. En la práctica se emplea el *mili-microcurie*.

Por medio de un estudio sistemático de perfiles, se llega a localizar las zonas de emanación máxima, que deben servir para interpretar el problema propuesto.

Aun en los casos más favorables, la profundidad de investigación no puede pasar actualmente de una veintena de metros.

*El método sísmico* corresponde a los que estudian los campos de fuerza producidos artificialmente.

Es curioso conocer el proceso que han seguido los fundamentos de este método, que no describimos por haberlo hecho ya el señor Inglada en su notable discurso pronunciado en esta Academia, en la sesión inaugural del Curso de 1930-1931.

Algunos creen que el método ha sido descubierto en la guerra europea, al hacer experimentos sísmicos para determinar la posición de las baterías enemigas. Nada más lejos de la realidad. La resolución de este problema exigiría que no se disparasen simultáneamente varias baterías; que la constitución geológica del terreno situado entre aquélla y los sismógrafos fuese conocida y no

tuviera accidente tectónico alguno; que la estratificación del subsuelo fuese horizontal y que avisasen cuándo se iba a disparar para poner en marcha las películas fotográficas de los aparatos registradores, que se gastan a la velocidad de un metro y más por segundo, etc., etc.

El proceso histórico del método comienza en el año 1846, cuando Robert Mallet equipó a los observatorios magnéticos con instrumentos registradores apropiados para el estudio de los terremotos e hizo observaciones de la transmisión de la onda submarina y sonora, producidas por explosiones, según se explica en la página 96 de la obra *Transaction of the Royal Irish Academy*.—Vol. XXI.—1846.

Poco después midió la velocidad sísmica en la arena, que resultó ser de 250 m. s.; en el granito descompuesto, de 398 m. s., y en el duro, de 518 m. s. En el día de hoy se aprecia claramente que sólo midió las ondas superficiales.

Unos treinta años después, *Abbot* observó el terremoto producido por una explosión de 23.000 kg. de dinamita, en Hallet's Point, New York, y pudo medir una onda de 2.500 m. s. a los 13 kilómetros de distancia y otra de 1.600 a los 22. (*On the Velocity of Transmission of Earth Waves. American Journal of Science and Arts. Vol. XV. 1878.*)

Después repitió los experimentos con cargas de dinamita de 30 a 180 kg., y en quince mediciones obtuvo la velocidad de 1.800 metros por segundo; una mínima de 380 y una máxima de 2.700, sin poder explicarse las causas que las originaban.

*Hecker*, el año 1900, profundiza más la investigación de los anteriores, colocando en Kummersdorff, cerca de Berlín, nueve sismógrafos a la distancia mutua de 70 metros para observar una explosión de 1.500 kgs. de dinamita. Ideó un mecanismo para registrar eléctricamente el momento de la explosión, y así obtuvo para la capa superficial la velocidad de 205 m. s.

Apreció claramente que los sismogramas tenían dos clases de ondas preliminares, sin poder explicarse la razón de la diferencia, entre las que después se han llamado *ondas individuales* y las *normales*, que es uno de los fundamentos de la prospección sísmica actual. Sus trabajos están descritos en *Gerland's Beiträge zur Geophysik*. 1900. Vol. IV.

Casi al mismo tiempo, *Belar* observó que el carácter de la propagación de las ondas sísmicas depende de las propiedades elásticas del medio en que se propagan (*Die Erdbebenwarte*. Pág. 59. 1901), lo que constituye otra de las ideas fundamentales de la cuestión.

La publicación del libro de *Wiechert*, en 1907, *Ueber Erdbebenwellen*, inicia una nueva época en la sismología científica, al determinar por vez primera la sucesiva serie de capas que constituyen el globo terráqueo por medio de una curva dromocrónica deducida de la observación de los terremotos naturales.

En el año 1910, *Mohorovicic*, al estudiar el terremoto del 8 de octubre de 1909 (*Year book of the Meteorological Observatory at Zagreb. Agram*), determina las dos clases de ondas preliminares; la onda normal P y la individual  $\bar{P}$ , que ya habían sido notadas por *Hecker*.

En realidad, ya estaban descubiertos todos los conocimientos del método sísmico, pero no se aplicaron a la prospección hasta el año 1914, en que *Fessenden*, de *Boston U. S. A.*, patentó un procedimiento para localizar masas minerales ocultas en el subsuelo, por medio de ondas sonoras, registradas en receptores apropiados. (*Method and Apparatus for Locating Ore-Bodies.*)

Poco después patenta *Mintrop* su método en Alemania y funda la Sociedad *Seísmos*, que se dedica a su explotación industrial el año 1921.

Desde entonces, los progresos del método son rápidos e innu-

merables. *Ambrohn* introduce en la prospección los aparatos de registro galvanométrico; *Schweydar* perfecciona los sismógrafos de *Mintrop*; el autor de estas líneas idea un aparato para registrar el instante de la explosión, etc.

Una vez conocida la contribución de cada uno de los sismólogos citados al desarrollo del método sísmico de prospección, se comprenderá la falta de razón de *Gutenberg* al afirmar, en su obra *Lehrbuch der Geophysik, 1927*, que todas las aplicaciones de las curvas dromocrónicas caen bajo la patente de *Mintrop*. Es lo mismo que si *Zeiss* tuviera la pretensión de patentar los fenómenos de la reflexión o refracción de la luz.

El método sísmico de prospección presenta infinidad de aplicaciones, ya sancionadas por la práctica. Ha servido al Instituto Geológico y Minero de España para determinar la situación y profundidad de varios de los ricos yacimientos que forman parte de la cuenca potásica situada en la falda meridional de los Pirineos; la de la prolongación de la cuenca carbonífera de Villanueva de las Minas, etc., etc.

*Los métodos eléctricos* se fundan en el estudio del campo eléctrico o electromagnético producido en el suelo por medio de una corriente eléctrica.

Los métodos electromagnéticos han sido desarrollados por *Lundberg* y *Sundberg*, con arreglo al siguiente principio: la corriente eléctrica alterna enviada al suelo por conducción directa o por inducción, produce un campo magnético secundario, al encontrar un cuerpo conductor. Este campo se superpone al campo magnético primario originado por la corriente inicial e introduce en él anomalías, cuyo estudio e interpretación nos permite indicar la posición desconocida del conductor que las ha producido.

La conducción directa de la corriente al suelo, cada vez menos usada, se efectúa por medio de tomas de tierra, situadas en

dos líneas paralelas, que han recibido el nombre de electrodos lineales.

El campo electromagnético primario se crea por la inducción producida por una corriente alterna que circula por una espira cerrada, bien aislada. El campo primario induce una corriente secundaria en un cuerpo conductor situado en el subsuelo y ésta, a su vez, da origen a un campo magnético secundario, del que se miden sus componentes horizontal y vertical.

La medición de los valores absolutos de las componentes del campo magnético secundario presenta grandes dificultades, por lo que *Lundberg* y *Sundberg* han recurrido al método de comparar sus valores relativos, que ha permitido resolver con éxito muchos de los problemas de prospección que les han sido presentados.

Entre los métodos que estudian la variación del potencial eléctrico en la superficie del suelo, producida por la aplicación de una corriente, el más importante es el de la *carta de las resistividades*, ideado por *C. y M. Schlumberger* en 1912, pero que no se aplicó hasta el año 1921. Consiste en medir la resistividad del suelo en diferentes puntos y deducir de sus valores observados la constitución geológica del subsuelo.

La medida de las resistividades puede hacerse a profundidad constante, en cuyo caso se obtiene una verdadera carta geológica, en que cada formación está caracterizada por aquel parámetro físico, en lugar de serlo por sus caracteres litológicos o paleontológicos; o a profundidad que aumente progresivamente, lo que equivale a efectuar un verdadero sondeo eléctrico.

También tiene importancia el método llamado de la *carta de los potenciales*, consistente en estudiar las deformaciones que presentan las líneas equipotenciales determinadas sobre el terreno. Si existe en el subsuelo una masa más conductora que el medio am-

biente, las líneas equipotenciales se aproximan a ella; lo contrario sucede si la masa subterránea es más resistente.

En la interpretación de las deformaciones hay que tener en cuenta los efectos perturbadores debidos al contacto de dos terrenos de resistividades distintas; a la anisotropía de los terrenos sedimentarios, que conducen mejor la corriente en la dirección de los estratos, que en la normal a ellos, y a las irregularidades topográficas de la superficie del suelo.

Para la aplicación de los dos métodos citados últimamente, *Schlumberger* emplea la corriente continua. Los suecos y norteamericanos han efectuado estudios análogos, por medio de la corriente alterna.

El empleo de la corriente alterna presenta, a primera vista, grandes ventajas, puesto que elimina la acción de las corrientes telúricas, la polarización de los electrodos, etc. También se presta al empleo de amplificadores, que permiten medir las más pequeñas variaciones de potencial, con aparatos de sensibilidad media.

Pero si se trata de analizar la esencia de los fenómenos, entonces la corriente alterna presenta graves inconvenientes. La autoinducción de cada filete primario, la inducción mutua de los filetes entre sí y con el cable aéreo que une las tomas de tierra, originan corrientes inducidas que circulan por el suelo, cuyo efecto no podemos separar del de la corriente primaria.

La resistividad en el caso de corriente alterna no depende exclusivamente de la diferencia de potencial e intensidad de la corriente como en el de la corriente continua. Intervienen también la autoinducción del circuito, su capacidad y la frecuencia de la corriente, a cuya influencia, imposible de apreciar en el fenómeno total, se le ha dado el nombre de *efecto pelicular*, llamado así porque la corriente alterna atiende a localizarse en la superficie del terreno, mucho más que la continua.

El efecto pelicular ha sido estudiado por *Gutton*, en el capítulo X de su obra *Radiotechnique Générale*, y es de tal importancia, que en un terreno cuya resistividad sea de 10 ohmios m.<sup>2</sup>m., muy frecuente en las regiones petrolíferas, la *profundidad de penetración* de la corriente, es decir, aquella para la cual su densidad es la mitad del valor máximo, es sólo de 50 metros, si se emplean las corrientes de frecuencias telefónicas, es decir, del orden de 1.000 períodos. Si el terreno es resistente ( $\rho = 1.000$  ohmios), la profundidad de penetración es de 500 metros.

Las frecuencias elevadas tienen muy poca penetración, aun en los terrenos resistentes. Por ejemplo: si la frecuencia es 50.000 y la resistividad 1.000, la penetración no es más que 70 metros y 7 si la resistividad es 10.

Una vez hecha esta ligerísima reseña de los métodos geofísicos de prospección, veamos cuáles deben ser sus condiciones de aplicación en la práctica.

Los problemas que se presentan en ella son de dos clases. En una de ellas se conoce la estructura geológica del terreno y se trata de encontrar una mena de propiedades físicas determinadas; por ejemplo, la sal, en las investigaciones sísmicas de la cuenca potásica catalana. En la otra, se suponen conocidas dichas propiedades físicas y se busca la estructura geológica favorable a la existencia de aquella mena, como sucede en las investigaciones petrolíferas.

Tanto en un caso como en otro, se debe proceder de antemano a la medición directa de los parámetros físicos de las diversas rocas que se presentan en el problema, en sus afloramientos situados en la zona de investigación o próximos a ella.

Si estos afloramientos no existen, se deben efectuar mediciones previas en las regiones análogas a la que se va a investigar, donde ya se hayan efectuado sondeos o trabajos mineros.

En una palabra, cuando el geofísico estudia una región por vez

primera, existe la necesidad de un período de documentación y de tanteos, destinado a suministrarle una base sólida en que apoyar las investigaciones ulteriores.

Las mediciones deben comenzar en la zona conocida para extenderse a la región virgen que se desea investigar.

\* \* \*

Las aplicaciones de los métodos geofísicos de prospección se extienden, no sólo a la resolución de los problemas geológicos y mineros, sino también a la de otros que corresponden a las demás ramas de la ingeniería, entre los que mencionaremos algunos de los más importantes.

Por medio de observaciones sísmicas, se puede medir el valor de la flecha de la oscilación de un puente, al paso de una carga móvil, y deducir el estado de su resistencia mecánica, según los trabajos de N. Vechniakov, *Investigations Seismometriques de Quelques Ponts a Leningrad*, efectuados en varios puentes de Leningrado.

Por el mismo método y por el eléctrico, se puede determinar la profundidad que deben tener los cimientos de las pilas de los puentes u otras construcciones.

En Alemania se estudian sistemáticamente por el *Dr. Risch* (*Der Strassenbau*, págs. 397-399) las vibraciones producidas por el tráfico en los firmes de las carreteras mediante el método sísmico, para que en cada lugar tenga la necesaria resistencia al fin de su buena conservación. Este trabajo tiene una importancia económica extraordinaria, tanto en los proyectos de nuevas obras como en las reparaciones de las ya terminadas.

El método eléctrico se emplea para predecir las zonas inundadas o de terrenos sueltos, en la perforación de túneles (*E. G. Leo-*

*nardon, Electrical exploration applied to geological problems in civil engineering).*

Por medio de las ondas hertzianas se localizan las zonas acuíferas de las minas de sal, aprovechando la propiedad del agua de impedir el paso de las ondas o reflejarlas en su superficie.

También se aplican los métodos geofísicos de prospección para las investigaciones de aguas subterráneas; unas veces, de modo indirecto, al determinar las estructuras favorables para contenerlas, y otras, directamente, por medio de mediciones eléctricas.

En la resolución de esta clase de problemas se presentan grandes dificultades. Salvo en los países desérticos, todos los terrenos son húmedos y las zonas acuíferas no se distinguen fácilmente del medio en que se encuentran.

Por el contrario, es muy fácil apreciar si el agua es dulce o salada, por la gran diferencia de resistividad que ambas presentan.

Otra de las aplicaciones más recientes es la de obtener *testigos eléctricos* de los sondeos en lugar de los mecánicos, con gran economía de tiempo y de gasto (C. y M. Schlumberger. *Communication sur le carottage électrique. Congrès International du Forage. Paris, 1929*). Las mediciones eléctricas efectuadas en un sondeo permiten construir su *diagrama eléctrico*. Las resistividades se diferencian mucho en general; sin embargo, es muy difícil deducir la naturaleza de una roca por el valor de su resistividad, puesto que ésta varía, aun en la misma roca, según la cantidad de agua que contiene, su grado de salinidad, su temperatura y el sentido de la estratificación.

Por el contrario, las resistividades de los diversos horizontes de una serie estratigráfica conservan, en general, sus valores relativos en grandes extensiones. El diagrama eléctrico de un sondeo tiene por una silueta característica, análoga a la de los sondeos próximos y permite, por consiguiente, determinar su *corre-*

*lación geológica*, de la misma manera que un horizonte fosilífero característico, que no siempre suele encontrarse.

\* \* \*

No obstante su reciente aparición, la geofísica ha realizado en estos últimos años progresos rápidos y variados de los que han derivado aplicaciones importantísimas, que permiten considerarla como una nueva rama de la ciencia. Por estar aún en su infancia, la geofísica aplicada se ve obligada a valerse de hipótesis razonables para explicar multitud de fenómenos tan interesantes, como misteriosos, y estas hipótesis se van modificando sucesivamente para hacerlas compatibles con los nuevos hechos que la observación directa va conquistando de día en día.

Para no citar más que un caso, la teoría aplicada en la prospección sísmica para determinar la profundidad a que se halla la superficie de separación de dos estratos, exigía que la velocidad de propagación de las ondas elásticas fuera mayor en el estrato inferior, pues en otro caso las leyes de la refracción inducían a creer que el rayo sísmico no podría llegar a la superficie terrestre en que se asientan los sismógrafos registradores.

Multitud de hechos, por nosotros observados, y en pugna con dicha teoría, nos llevaron a admitir una nueva hipótesis, compatible con ella, la del rayo normal, que nos ha servido en nuestras investigaciones de prospección sísmica para resolver algunos problemas geológicos, demostrándose así la afirmación del Sr. Hauser en su discurso de recepción en esta Academia, que el verdadero progreso de las ciencias estriba en la experimentación, especialmente si ésta se ve impulsada por un noble entusiasmo, capaz de arrollar los obstáculos cruzados en el camino que lleva al conocimiento relativo de la verdad, ya que la verdad absoluta no

es accesible a nuestra inteligencia, y sólo podemos tener atisbos de ella, por medio de la fe en Dios, creador de todo el Universo y en quien está la explicación de todas las causas primeras, que la humanidad no alcanzará nunca, a pesar de los inmensos progresos de la ciencia, puesto que ésta, al descorrer el velo que ocultaba la explicación de un misterioso fenómeno, descubre nuevos enigmas que brindan más amplios horizontes a la investigación, cuyos dominios se ensanchan continuamente por lo mismo que son infinitos e inagotables.

He dicho.

# CONTESTACIÓN

DEL EXCMO. SEÑOR

D. ENRIQUE HAUSER Y NEUBURGER

SRES. ACADÉMICOS. SEÑORAS Y SEÑORES:

¡Quién había de decirme que sería yo quien contestase al discurso de recepción en esta Academia del sucesor de mi inolvidable amigo y compañero el Excmo. Sr. D. José M.<sup>a</sup> de Madariaga, quien hace veinticinco años me hizo el gran honor de contestar a mi discurso de recepción en esta docta casa!

Conocí a D. José M.<sup>a</sup> de Madariaga en octubre de 1886, en el Laboratorio de la Escuela de Minas, a donde siendo yo alumno fui llamado, a practicar, por el entonces Director de la Escuela de Minas y Jefe del Cuerpo Excmo. Sr. D. Luis de la Escosura, individuo de número de esta Academia. Poco antes había sido trasladado a dicho Laboratorio, procedente de las minas de Almadén, nuestro inolvidable compañero D. José M.<sup>a</sup> de Madariaga: él tenía entonces treinta y un años; yo, veinte, y desde entonces, aunque nuestras opiniones religiosas fueran muy distintas, como teníamos el mismo sentido moral de la vida, siempre nos unió una amistad sincera y de mutua confianza. Así nos había acercado nuestra afición a la Química, bajo los auspicios de aquel hombre extraordinario, D. Luis de la Escosura, que procuraba rodear-

se de los que él creía pudieran secundarle en el desarrollo de la ciencia química en España.

La obra de Madariaga es bien conocida, y con lo dicho en la sesión necrológica celebrada en su honor en la Escuela de Ingenieros de Minas el 3 de abril de 1934 y lo que nos acaba de referir nuestro nuevo compañero Sr. García Siñeriz podría considerarse agotado el tema, pero he tenido tanta relación en mi vida con el ilustre académico que hemos perdido, llegando a consultarnos mutuamente nuestras dudas en los distintos asuntos que teníamos entre manos, que creo que podré añadir todavía algunas palabras.

Hijo de un minero práctico, heredó Madariaga de su padre la afición al trabajo manual y el gusto al estudio de los fenómenos naturales, lo que unido al de las enseñanzas teóricas en los primeros años de la carrera, que con su aplicación e inteligencia pudo apropiarse, le permitieron ocupar en el ejercicio de su profesión al lugar preeminentemente bien conocido de los que me escuchan.

Así como en Almadén transformó las prácticas rutinarias del beneficio del azogue en una ordenación del mismo, perfeccionándolo, en el Laboratorio de la Escuela de Minas, aprovechando las enseñanzas de Escosura, llegó a eludir la tutela de los preparadores del Laboratorio, realizando él solo los más delicados trabajos de ensayos o análisis minerales.

Designado por Escosura, en 1891, para explicar la cátedra de Electrotecnia, de nueva creación, en la Escuela de Minas, sin haber entonces salido al extranjero y sin otro iniciador en esos estudios que el eminente ingeniero español y miembro de esta Academia D. Francisco de Paula Rojas, autor de un notable *Tratado de Electrodinámica Industrial*, demostró Madariaga ser un autodidacto en esas materias, a lo que sirvió de base su sólida preparación en las ciencias experimentales. De cómo supo acreditar esta

enseñanza en la Escuela de Minas, a donde venían a aprender ingenieros de otras procedencias, no tengo nada que añadir a lo que todos conocéis.

De su labor administrativa como Director de la Escuela de Minas (1913-1916) no es aquí lugar para hablar de ella y me basta decir que esa pesada labor no le hizo desatender sus estudios de Electrotecnia ni perder su afición a la Química, prestando especial apoyo a estas enseñanzas en la Escuela.

A fines de 1915 ocupó D. José M.<sup>a</sup> de Madariaga la presidencia del Consejo de Minería, por fallecimiento de su antecesor en este cargo, el notable Ingeniero de Minas D. Luis Adaro, interesándose por el progreso de la minería española, de lo cual es muestra el notable trabajo que con el título "Pasado, presente y porvenir de la minería española" publicó como introducción del primer número (junio de 1917) del *Boletín Oficial de Minas y Metalurgia*, cuya creación fué debida al distinguido Ingeniero de Minas don Fernando B. Villasante. Consigna en dicho trabajo la importancia de la minería en España y, después de hacer una breve reseña histórica de la misma, habla del estado actual de ésta y su porvenir, pudiendo decirse que es un modelo de estudio digno de ser tenido presente en las actuales circunstancias. Por esta época tuvo la satisfacción de ser designado para ocupar interinamente la Dirección general de Agricultura, Minas y Montes. Intervino con su elevado criterio en la legislación de las minas de sales potásicas de 1918.

Creado en dicho año el Consejo de Administración de las Minas de Almadén, fué nombrado Vocal del mismo y elegido, al poseer el cargo de Vicepresidente de dicho Consejo. Aunque en enero de 1919 solicitó su jubilación, no por eso abandonó el Consejo de las Minas de Almadén, continuando en este cargo gratuitamente hasta junio de 1920, del que ocupó su presidencia

cerca de ocho meses. Durante su gestión se llevó a cabo la primera reorganización del trabajo en las minas y se planeó a fondo la electrificación de servicios y conducción de aguas al Establecimiento.

Pero por poco tiempo había de quedar libre de un trabajo activo nuestro inolvidable compañero, pues al año escaso de su jubilación entró a desempeñar el cargo de Secretario perpetuo de esta Corporación, por fallecimiento del Excmo. Sr. D. Francisco de P. Arrillaga, que tan bien había sabido desempeñar las complicadas atenciones que dicho puesto requiere. Lo que representa el ejercicio de la Secretaría no puedo expresarlo mejor que nuestro compañero Sr. Novo lo hizo en la sesión necrológica antes referida y de la cual transcribo el siguiente párrafo:

“Tiene el puesto de Secretario un no sé qué de humilde con un sí sé qué de máximo empeño, como aquel donde cada cual descarga protestas y expone afanes. Llena funciones, sobre deslucidas, múltiples, complicadas, enfadosas por accesorias y espinosas por arduas; ha de preparar el Secretario labor al Presidente y a las Juntas; dará rápida y cortés respuesta a cuantos a él se dirijan, porque de su paciencia para oír, juicio para conceder y diplomacia para negar depende el prestigio común. Enlazará su Corporación con nacionales y extranjeras, sin desatender disposiciones y protocolos administrativos y conllevando al personal subalterno.”

Ahora bien; su amor a esta Academia era tal que no le bastaba con su Secretaría, pues se interesaba vivamente por la labor de todos sus compañeros, de tal modo que al recibir esta Corporación el Legado del Conde de Cartagena, en 1932, me secundó en el cargo de Tesorero con verdadero entusiasmo, llevando una contabilidad particular de esos fondos, además de la oficial que tiene esta Academia, y llegando a preguntar por el movimiento de los mismos tres días antes de su muerte.

Al dedicar estas palabras al que fué nuestro querido compañero Madariaga, sólo me queda decir que continúa tan vivo en nuestro recuerdo que, olvidando a veces su ausencia, pensamos en consultarle.

Ha venido a ocupar su vacante un discípulo suyo, el Ingeniero de Minas D. José García Siñeríz, cuyo interesante discurso acerca de “La Geofísica aplicada a la prospección”, acabáis de oír.

El estudio de la Geofísica no ha sido extraño a esta Academia, pues tuvo sus precursores en dos individuos de la misma, los señores Mier e Inglada, quienes precisamente fueron maestros del Sr. García Siñeríz.

En efecto, el Ilmo. Sr. D. Eduardo Mier, en su discurso de entrada en esta Academia (1911), se ocupó de la utilidad de la Sismología y después de hacer referencia a las posibles aplicaciones prácticas de la misma, se extendió en el estudio de la constitución interna de la Tierra, estudio que sirve a su vez de base para nuevas aplicaciones de la Sismología. El Ilmo. Sr. D. Vicente Inglada, en su discurso de entrada en esta Corporación (1929), se ocupa especialmente del estudio de la propagación de las ondas sísmicas, por medio de los sismogramas, para hacer deducciones importantes sobre la composición de dichas ondas y situación del foco sísmico. Más tarde, el Sr. Inglada, en su discurso “La Prospección sísmica en España”, leído en la sesión inaugural del curso académico de 1930-31, nos habla ya de los trabajos realizados por el Sr. García Siñeríz, sobre ese asunto, en el Instituto Geológico y Minero de España.

Nacido el Sr. Siñeríz en 1886, cursó con gran brillantez sus estudios en la Escuela de Minas de Madrid, terminando la carrera en 1908 con nota de sobresaliente y obteniendo, en consecuencia, gratuitamente su Título profesional. Después de realizar sus prácticas de carrera en el extranjero, ingresó en 1909 en el

Instituto Geográfico y Estadístico, en donde prestó sus servicios hasta 1927, es decir, durante diez y ocho años.

Los primeros trabajos de Geofísica realizados por el Sr. Siñeríz, en el Instituto Geográfico, fueron hechos bajo la dirección de nuestro inolvidable compañero Sr. Mier, quien impulsado por un noble afán científico, se dedicó a organizar la Sismología española. Entre sus colaboradores se encontraba, como hemos dicho, el Sr. García Siñeríz, quien efectuó numerosos estudios de los trabajos publicados hasta el día, destacando entre ellos la traducción al español de la mejor obra publicada sobre la materia "Vorlesungen uber Seismometrie", debida al príncipe ruso Galitzin, versión realizada en colaboración con los Sres. Inglada y Castillo. Después, el Sr. García Siñeríz tradujo del alemán el primitivo trabajo de Eötvös, sobre la balanza de torsión, del cual había dado también una descripción el Sr. Inglada. Estos trabajos fueron los que han servido de base a todos los que después han sido escritos, en español, sobre el mismo tema.

Al adquirir una balanza de torsión Eötvös, el Instituto Geográfico y Estadístico, el Sr. García Siñeríz, en unión de otros distinguidos ingenieros, realizó un estudio de ensayo, con dicha balanza, en la cuenca potásica de Cataluña, trabajo que fué presentado en el Congreso Geológico internacional celebrado en Madrid en 1926. La consecuencia de ello fué, para el Sr. Siñeríz, recibir el encargo por las cuarenta y cinco naciones representadas en dicho Congreso de traer a la próxima reunión, que había de celebrarse en Pretoria tres años después, un estudio sobre "Los Métodos geofísicos de prospección", acerca de cuyo trabajo volveremos a ocuparnos más adelante.

En el interin, el Sr. García Siñeríz divulgaba sus conocimientos en estas materias por medio de Conferencias, de las que, las explicadas en la Escuela de Minas de Madrid, llamaron la aten-

ción del Director del Instituto Geológico y Minero de España, Excmo. Sr. D. Luis de la Peña, quien, siguiendo la tradición de dicho Instituto, brillantemente inaugurada en 1873, en la Comisión del Mapa Geológico por su Director Excmo. Sr. D. Manuel Fernández de Castro, individuo de esta Academia, de atraer a dicho Centro los distinguidos en la Geología y ciencias afines, invitó al Sr. Siñeriz a prestar sus servicios en el referido Instituto, creando para él una Sección de Geofísica, en junio de 1927.

Ya en la nueva situación pudo el Sr. Siñeriz dar rienda suelta a sus aficiones, siendo el resultado su referida obra titulada "Los métodos geofísicos de prospección y sus aplicaciones a la resolución de varios problemas geológico-tectónicos", que fué publicada por el Instituto Geológico en 1928 y presentada al siguiente año en el Congreso Geológico de Pretoria (Transvaal). En dicho trabajo de cerca de 500 páginas y un atlas, después de estudiar el Sr. Siñeriz los distintos métodos geofísicos, poniendo ejemplos de su aplicación, hace una especial a la investigación geofísica de la cuenca carbonífera de Villanueva de las Minas, utilizando sucesivamente los métodos eléctrico, gravimétrico, magnético y sísmico al fin indicado, exponiendo los resultados prácticos obtenidos. Con motivo de dicho trabajo, se le nombró en el referido Congreso presidente del Comité Internacional de Geofísica, en el que figuran como vocales los más eminentes geólogos del mundo, y se tomó de acuerdo, por aclamación, de enviar un radiograma al Instituto Geológico de España, en el que se le felicitaba por la actuación del Sr. García Siñeriz y se decía que había laborado grandemente por la gloria y prestigio de España. El diario *The Pretoria News* del 29 de julio de 1929, dice textualmente: "Los métodos geofísicos de prospección del Sr. Siñeriz han causado una gran sensación en el mundo geológico, por ser la primera vez que han sido revelados los métodos y fórmulas de la Geofísica apli-

cada, que habían sido mantenidos en el más riguroso secreto hasta hoy”, etc., etc.

Poco después, en los Estados Unidos, en el número de noviembre del *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, página 1489 y siguientes, se publica una reseña encomiástica de la obra, que considera de extraordinario interés.

En 11 de junio de 1930, la Sección de Ciencias Físicas de esta Academia, presentó al pleno de la misma un informe del cual era ponente el Académico Sr. Inglada, referente a la indicada obra, y en el que se decía: “La penosa y abnegada labor que el Sr. García Siñeriz ha realizado al adquirir tan importantes conocimientos científicos, que difunde generosamente sin ocultar el más nimio detalle de ejecución técnica, en lugar de reservarlo en su personal provecho, como han hecho otros investigadores, bien merece una valiosa recompensa honorífica, que, por una parte, mostraría el reconocimiento oficial de nuestro país a la labor científica tan relevante, y por otra, serviría de estímulo al Sr. García Siñeriz para realizar nuevas investigaciones, que contribuyeran al rápido progreso de la Geofísica aplicada.”

La Academia, por unanimidad, acordó concederle, fuera de concurso y como premio extraordinario, una Medalla de oro.

Casi al mismo tiempo la Sociedad Geológica Alemana le nombró miembro de honor. Poco después la obra citada fué declarada de texto en la Escuela de Minas del Colorado (Estados Unidos), y su Director, Dr. Heiland, solicitó un retrato del Sr. Siñeriz para colocarlo en aquélla en sitio de honor. En la Escuela de Minas de Madrid también sirve de texto la referida obra.

Recientemente (1933) ha publicado el Sr. Siñeriz otra obra que forma parte de las Memorias del Instituto Geológico y Minero de España, titulada “La interpretación geológica de las condiciones geofísicas aplicadas a la prospección”, y en la cual, con

una extensión de 500 páginas, después de explicar los principales perfeccionamientos en los métodos y aparatos empleados en la prospección geológica, hace aplicación de los mismos en las investigaciones sísmicas siguientes: en la zona potásica de Callús, la zona potásica de Suria, zona potásica de Sallent, anticlinal de Bellmunt, anticlinal de Tafalla, en la concesión "Elorz" de la Compañía de Sales Potásicas de Navarra, y en Hiendelaencina, completando esta última el trabajo de investigación por el método electromagnético, realizado ya en la misma zona y descrito en la obra publicada en 1928. Constituye la segunda parte del trabajo citado, las investigaciones gravimétricas realizadas en Burgo de Osma y Berlanga de Duero, en la meseta terciaria de Madrid-Alcalá de Henares-Torrelaguna, petrolífera de Garrucha (Almería), ocupándose en el último capítulo de la investigación gravimétrica del anticlinal de Tafalla.

A pesar del poco tiempo transcurrido desde la publicación de esta obra, ha sido ya objeto de la atención de personalidades autorizadas; así, refiriéndose a una de las investigaciones que constan en la misma, la Universidad de Berlín ofició al Instituto Geológico diciendo que el trabajo efectuado por el Sr. Siñeriz era el mejor que se había hecho en el mundo, y el Director del Servicio Geológico de Inglaterra, Sir John Flett, dice en una carta que dicho libro es una obra maestra.

Hecha ya la presentación del Sr. García Siñeriz, sólo me queda decir algunas palabras sobre la utilidad de la Prospección Geofísica. Las aplicaciones a que aquí hemos de referirnos, son de dos clases: las que se relacionan directamente con la Geología y las que trascienden a la Minería, es decir, al descubrimiento de las riquezas minerales.

Al hacer los geólogos un estudio superficial del terreno, necesitan completarlo con el de su situación en sentido vertical, cons-

tituyendo así una representación estratigráfica del mismo. Ahora bien; para hacer esto han de servirse de las manifestaciones en la superficie de dichos terrenos y utilizando las características de dirección y buzamiento de las capas, constituir lo que se llama un corte geológico de los mismos. Como esto no siempre es posible por falta de datos, se necesita hacer en esos casos sondeos mecánicos a dicho fin, y como esta es una labor cuyo coste crece rápidamente con la profundidad, de ahí que se haya tratado de utilizar la Geofísica para conocer la estratigrafía subterránea con mayor economía que por dichos sondeos, Cuando las capas, masas o filones cuya situación se busca contienen sustancias de valor comercial, nos encontramos en el caso de la prospección minera.

Para fijar ideas, diremos que una prospección sísmica representa un recorrido mínimo de unos cuatro kilómetros de perfiles, cuyo coste no suele exceder de 50.000 pesetas para alcanzar una profundidad de 1.000 metros, coste que tiende a disminuir con el perfeccionamiento de los aparatos empleados. Ahora bien; esa prospección nos indica las variaciones de profundidad de la capa o masa buscada, y si queremos comprobarla en un solo punto por un sondeo mecánico, éste costará, si ha de llegar a 1.000 metros, con las operaciones de toma de testigos, unas 350.000 pesetas. Como se ve, hay una importante economía, y tanto más cuanto que con el referido gasto de 50.000 pesetas pueden hacerse, en algunos casos, hasta seis perfiles de la longitud indicada, lo que equivale a otros tantos sondeos sísmicos.

Muchos descubrimientos mineros de importancia esperan, sin duda, al Sr. Siñeriz, pero para que esos descubrimientos aprovechen debidamente a nuestro país, es necesario que en vez de caer en poder de acaparadores, siempre dispuestos a encarecer la vida, sirvan, al contrario, para abaratarla, como exige el progreso, pues el verdadero progreso humano consiste en que con el esfuerzo,

o su valor monetario, antes requerido por un sólo individuo para vivir, puedan hacerlo ahora varios individuos, pues esa y no otra es la verdadera finalidad a la que deben conducir los progresos de la industria.

Sólo me queda desear al Sr. Siñeriz, para bien de España, un completo éxito en sus trabajos.

He dicho.