

EL POTENCIAL ESPONTÁNEO COMO HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA AFECCIÓN POR HIDROCARBUROS



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Cita: Queralt Capdevila, P., Ledo Fernández, J., Marcuello Pascual, A. El potencial espontáneo como herramienta para la caracterización de la afección por hidrocarburos. 2022. Universitat de Barcelona. Accessible a: <http://hdl.handle.net/2445/196182>



Aquesta obra està subjecta a la llicència internacional Creative Commons Attribution 3.0.

Per veure una còpia d'aquesta llicència, visiteu

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/>

Índice de Figuras

Figura 2.1 Esquema de la doble capa eléctrica en la interfaz agua-mineral que cubre un grano esférico. En este caso, la superficie mineral estaría cargada negativamente, de modo que sería apantallada por cationes (M^+) para contrarrestar el exceso de carga. Cuanto más lejos de la superficie mineral, la conductividad eléctrica disminuiría dado que las concentraciones de ambos tipos de cargas tenderían al equilibrio (extraído de [6]).	4
Figura 2.2 Correlación entre el potencial medido en la superficie y la diferencia de nivel piezométrico entre distintos piezómetros de una misma zona (modificado de [6]).	4
Figura 2.3 Ejemplo de anomalía de PE asociada a un depósito polimetálico de cobre en Azerbaiyán (Cáucaso) (modificado de [9]).	5
Figura 2.4 Bacterias en el suelo con sus cilios formando conexiones célula-célula y célula-mineral (extraído de [16]).	5
Figura 2.5 Perfiles de temperatura, SP y flujo de CO_2 en La Fossa di Vulcano (extraído de [17]).	6
Figura 2.6 Sección de un electrodo impolarizable de cobre-sulfato de cobre instalado (modificada de [21]).	6
Figura 2.7 Mapas de SP de la misma área en a) 1996 y b) 2007. Entre ambos períodos, hubo extracción de vapores (red SVE –soil vapor extraction- en negro) y, en consecuencia, una disminución de la biodegradación natural de la zona (extraído de [36]).	7
Figura 2.8 Esquema de evolución de la conductividad del suelo y la cantidad de hidrocarburo (extraído de [36]).	8
Figura 2.9 Relación entre valores de SP en superficie y concentraciones totales de PCE en piezómetros de control (extraído de [22]).	8

Contenido

1. Objeto	3
2. El Potencial Espontáneo	3
2.1. Mecanismos	3
2.2. Medición y prospección	6
2.3. SP y afección por hidrocarburos en suelos naturales	7
3. La prospección de SP en instalaciones industriales	9
3.1. Características de la técnica	9
3.2. Protocolo de adquisición	9
4. Discusión y conclusiones	10
5. Bibliografía	10

1. Objeto

El objeto del presente documento es poner en conocimiento de la sociedad la disponibilidad de una técnica de prospección geofísica no destructiva que permite detectar y localizar la afección por hidrocarburos en el subsuelo de instalaciones industriales.

La memoria recoge la descripción del fenómeno físico y los antecedentes de dicha técnica, citándose también novedades respecto a su aplicación en instalaciones industriales.

El documento puede ser de utilidad para los agentes que intervienen en actividades potencialmente contaminantes del suelo, así como de cualquier entidad que pueda acometer trabajos de caracterización de suelos con técnicas que complementen la ejecución de estas tareas.

2. El Potencial Espontáneo

El Potencial Espontáneo o SP por sus siglas en inglés (Self-Potential), es el nombre por el que se conoce el campo de potencial eléctrico natural. Se registra de forma pasiva en la superficie o en el interior de la Tierra, y es uno de los métodos geofísicos más antiguos. Se ha utilizado en multitud de aplicaciones para obtener información remota, principalmente, sobre movimientos de agua subterránea y/o sobre perturbaciones geoquímicas, geotérmicas o hidromecánicas en el subsuelo.

2.1. Mecanismos

Los valores de SP están condicionados por diferentes fenómenos físicos y químicos. Se distinguen tres principales tipos de contribuciones al SP:

- a) **Electrocínética:** el movimiento de un fluido con electrolitos a través de un medio poroso genera potenciales debido al acoplamiento entre los iones del fluido y las paredes eléctricamente cargadas (debido al fenómeno de la doble capa eléctrica, ver Figura 2.1) del conducto por el que éste circula. Las principales variables implicadas en este fenómeno son la conductividad eléctrica del fluido intersticial, la temperatura, la saturación de agua y/o gas, la granulometría y la porosidad. Así, el movimiento de agua subterránea afecta a los potenciales observados en superficie, permitiendo la cartografía del nivel piezométrico (ver Figura 2.2), el estudio de la actividad hidrotermal en sistemas geotérmicos, o incluso la predicción de la actividad volcánica. Esta contribución también se conoce como potencial electromecánico, de electrofiltración o de transmisión [1]–[5].

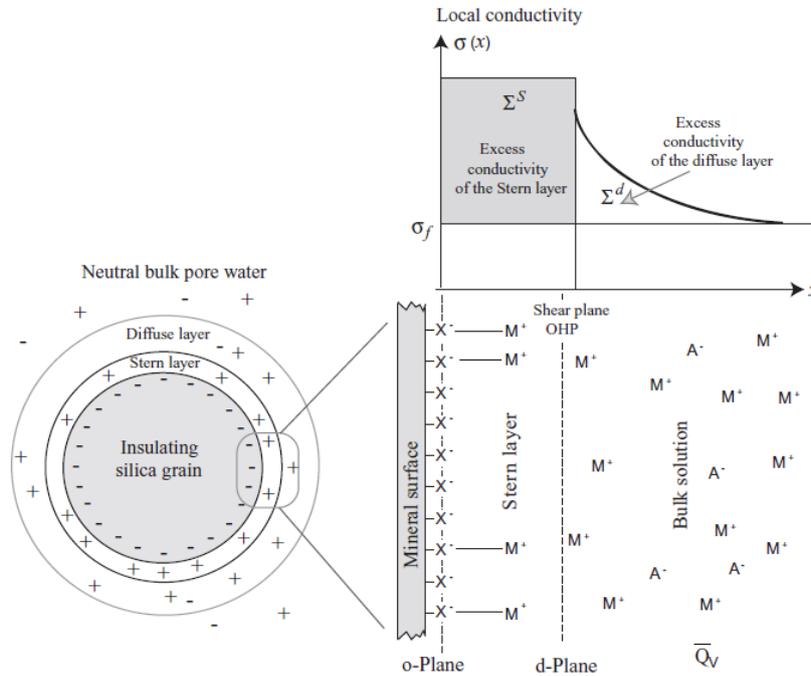


Figura 2.1 Esquema de la doble capa eléctrica en la interfaz agua-mineral que cubre un grano esférico. En este caso, la superficie mineral estaría cargada negativamente, de modo que sería apantallada por cationes (M^+) para contrarrestar el exceso de carga. Cuanto más lejos de la superficie mineral, la conductividad eléctrica disminuiría dado que las concentraciones de ambos tipos de cargas tenderían al equilibrio (extraído de [6]).

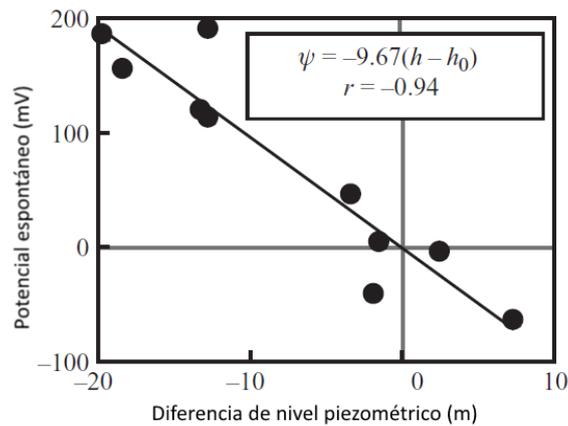


Figura 2.2 Correlación entre el potencial medido en la superficie y la diferencia de nivel piezométrico entre distintos piezómetros de una misma zona (modificado de [6])

- b) **Electroquímica:** las diferencias locales de concentración de electrolitos en un fluido generan potenciales de difusión a causa de las distintas movilidades iónicas. Las mineralizaciones en el subsuelo, en las que se esperarían gradientes de potencial redox, entrarían en la categoría de mecanismo electroquímico (ver Figura 2.3) [7]–[13]. Por otro lado, las bacterias presentes en el suelo juegan un papel importante en la distribución de las anomalías electroquímicas de potencial, ya que forman redes que permiten la conducción de electrones (ver Figura 2.4), por lo que las anomalías podrían permanecer deslocalizadas [14]–[16].

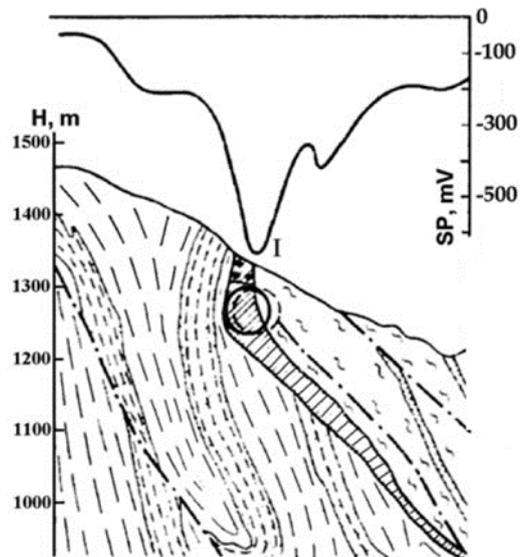


Figura 2.3 Ejemplo de anomalía de PE asociada a un depósito polimetálico de cobre en Azerbaiyán (Cáucaso) (modificado de [9])

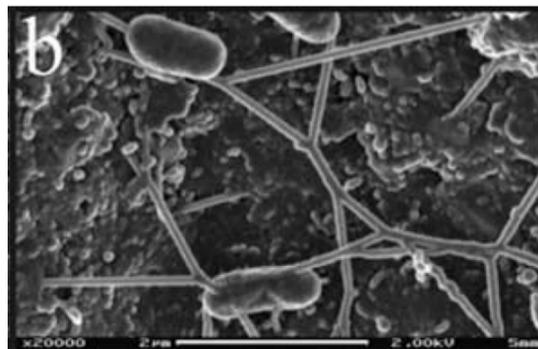


Figura 2.4 Bacterias en el suelo con sus cilios formando conexiones célula-célula y célula-mineral (extraído de [16]).

- c) **Termoeléctrica:** si existe un gradiente de temperatura mantenido en el tiempo entre dos zonas, se observará una diferencia de potencial entre ambas. Así, en sistemas geotérmicos y zonas volcánicas se suelen observar anomalías de potencial asociadas a grandes flujos de calor (ver Figura 2.5) [6], [12], [17].

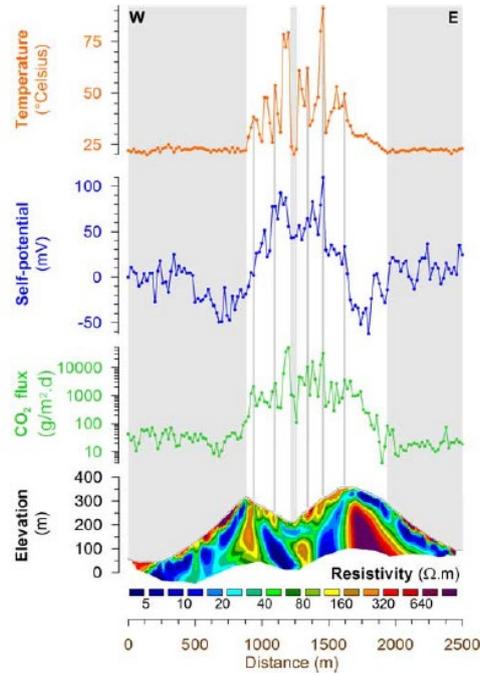


Figura 2.5 Perfiles de temperatura, SP y flujo de CO₂ en La Fossa di Vulcano (extraído de [17])

2.2. Medición y prospección

El SP se mide típicamente con electrodos impolarizables (ver Figura 2.7), en los cuales el potencial de electrodo no se ve afectado significativamente por la corriente que pasa a su través durante la medida, dado que la reacción es rápida [6], [10], [18]–[20].

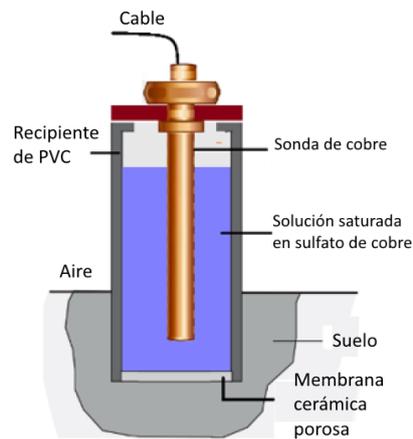


Figura 2.6 Sección de un electrodo impolarizable de cobre-sulfato de cobre instalado (modificada de [21]).

Dichos electrodos se entierran en los primeros centímetros del suelo, y con un voltímetro de alta impedancia se mide su diferencia de potencial respecto a un electrodo fijo que actúa como referencia. A continuación, se desentierra el electrodo y se instala en otra posición y se repite la operación, preferiblemente siguiendo perfiles paralelos. De este modo, se obtiene

una matriz de datos de potencial geoposicionados, los cuales se pueden interpolar y representar en forma de mapa de contornos (líneas equipotenciales) [6].

Dada su estabilidad temporal, los electrodos impolarizables también se pueden dejar enterrados, permitiendo monitorizar la señal a lo largo del tiempo.

Para minimizar la deriva que pueda existir en el electrodo, la referencia y/o en el propio campo de potencial eléctrico durante la prospección, se suelen repetir medidas en unos mismos puntos, cada cierto período de tiempo, corrigiendo linealmente los datos tomados entre cada par de medidas de control [6], [10].

Recientemente se han desarrollado electrodos que permiten medir el SP sin necesidad de ser enterrados, lo que habilita la toma de datos sobre pavimentos (como hormigón o asfalto),

2.3. SP y afección por hidrocarburos en suelos naturales

La relación del SP con la presencia de hidrocarburos en el subsuelo se asocia a procesos de naturaleza electroquímica (reducción y oxidación [22]–[30]), así como a la baja conductividad eléctrica de la pluma de contaminante una vez éste empieza a saturar la porosidad intergranular[31]–[35].

Por otro lado, la biodegradación (natural o inducida) de los hidrocarburos puede aumentar la conductividad del suelo (ver Figura 2.9), ya que los productos de la actividad microbiana son ácidos orgánicos que disuelven los minerales, aportando carga electrolítica al agua intersticial y aumentando así su conductividad eléctrica con el tiempo (ver Figura 2.10).

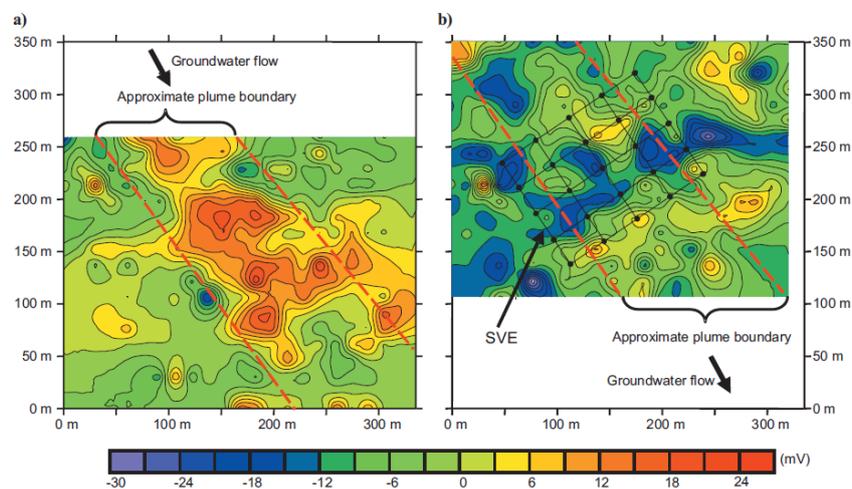


Figura 2.7 Mapas de SP de la misma área en a) 1996 y b) 2007. Entre ambos períodos, hubo extracción de vapores (red SVE –soil vapor extraction- en negro) y, en consecuencia, una disminución de la biodegradación natural de la zona (extraído de [36]).

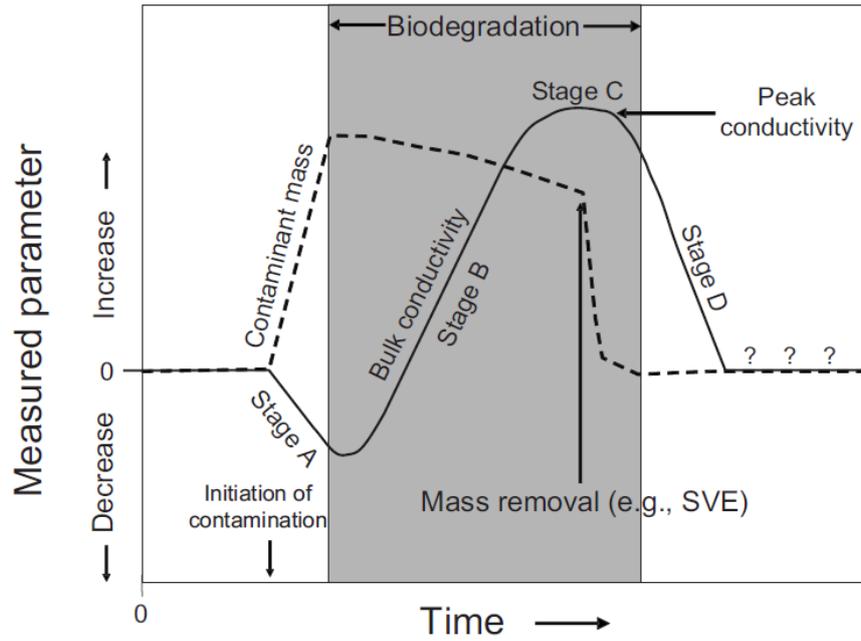


Figura 2.8 Esquema de evolución de la conductividad del suelo y la cantidad de hidrocarburo (extraído de [36]).

También se ha encontrado una relación directa entre la magnitud del SP y la presencia de compuestos organoclorados, como el percloroetileno [22] (ver Figura 2.11).

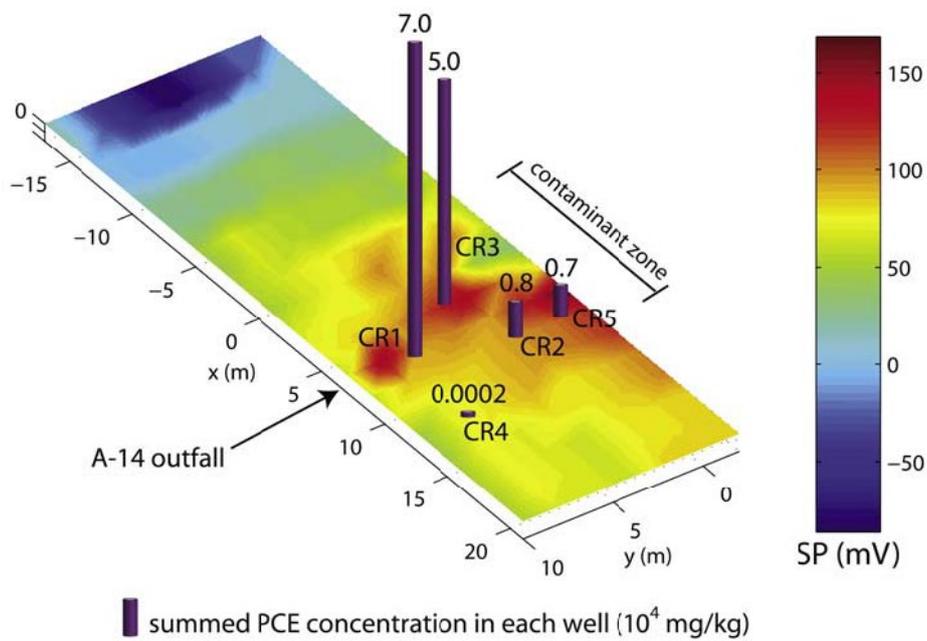


Figura 2.9 Relación entre valores de SP en superficie y concentraciones totales de PCE en piezómetros de control (extraído de [22]).

3. La prospección de SP en instalaciones industriales

Las instalaciones industriales en las que se almacenan hidrocarburos, como por ejemplo estaciones de servicio, centros logísticos de almacenamiento, unidades de suministro, etc., son emplazamientos susceptibles de presentar afección por hidrocarburos. En todos ellos son frecuentes las investigaciones del subsuelo con el objetivo de determinar si éste se encuentra afectado.

La prospección de SP constituye una herramienta eficaz para cumplir este objetivo.

3.1. Características de la técnica

La prospección de SP en instalaciones industriales presenta las siguientes características:

- La prospección puede realizarse en la totalidad del área ocupada por la instalación, a diferencia de la investigación convencional mediante sondeos.
- Al ser un método pasivo, no se inyecta energía ni ningún producto en el subsuelo, por lo que su utilización es segura.
- No se requieren permisos o licencias administrativas para el inicio de las prospecciones.
- El coste es reducido en comparación con la técnica convencional.
- Las repeticiones periódicas permiten tener un control de la evolución del estado de afección de una instalación.
- Su aplicación y obtención de resultados es rápida en comparación con las técnicas convencionales.

3.2. Protocolo de adquisición

Los trabajos de campo consisten en la adquisición de valores de potencial espontáneo a nivel de la superficie. Los datos se obtienen realizando medidas por la instalación, en líneas de adquisición paralelas equidistantes. Los trabajos deben ser realizados por un equipo de técnicos especialistas.

Los trabajos se inician con la instalación de un electrodo de referencia. La localización de este electrodo requiere de una elección cuidadosa por parte del equipo de trabajo para evitar posibles fuentes de ruido que condicionen el resto de las medidas. Una vez instalado el electrodo de referencia se procede a replantear la zona de trabajo. Finalizado el replanteo se procede a la adquisición de datos de potencial con el equipo de medida que, en caso de estar pavimentada la instalación, requerirá del uso de electrodos capaces de medir el potencial espontáneo sobre dichos pavimentos (hormigón, asfalto, etc.). Posteriormente a la adquisición, los datos son procesados e interpretados en gabinete para la elaboración de un mapa de campo de potencial eléctrico natural.

4. Discusión y conclusiones

A partir de la revisión presentada en este informe se puede concluir que la medición del Potencial Espontáneo (el campo de potencial eléctrico natural) es una herramienta eficaz y fiable en la investigación de suelos en emplazamientos industriales susceptibles de presentar afección por hidrocarburos. Esta técnica está a disposición de los titulares de actividades potencialmente contaminantes del suelo, así como de cualquier entidad que pueda acometer trabajos de caracterización de suelos y permite localizar la posible presencia de hidrocarburos en el subsuelo de una manera exhaustiva y con fiabilidad cuantificada.

Se observa una relación directa entre la presencia de hidrocarburos y los valores elevados de SP, de manera que los valores de SP medidos en instalaciones industriales son más elevados si hay presencia de hidrocarburos en el subsuelo. La obtención de la relación cuantitativa entre los valores de SP y la concentración total de hidrocarburos en el subsuelo (TPH) es un problema de mayor complejidad ya que no existe una expresión teórica que relacione los valores del SP y los TPH. Factores como el tipo y las condiciones de suelo y el tiempo desde que se infiltró el contaminante influyen de manera relevante en esta relación. Sin embargo, se podrían aplicar métodos probabilísticos robustos a partir de ensayos reales contrastando los valores de SP con los niveles de contaminantes medidos en piezómetros in situ, de modo que se disponga de modelos predictivos que permitan evaluar el estado de afección en base al mapa de potencial espontáneo.

5. Bibliografía

- [1] A. Revil, V. Naudet, J. Nouzaret, y M. Pessel, «Principles of electrography applied to self-potential electrokinetic sources and hydrogeological applications: HYDROELECTRIC COUPLING», *Water Resour. Res.*, vol. 39, n.º 5, may 2003, doi: 10.1029/2001WR000916.
- [2] A. Revil, P. A. Pezard, y P. W. J. Glover, «Streaming potential in porous media: 1. Theory of the zeta potential», *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 104, n.º B9, pp. 20021-20031, sep. 1999, doi: 10.1029/1999JB900089.
- [3] A. Revil, H. Schwaeger, L. M. Cathles, y P. D. Manhardt, «Streaming potential in porous media: 2. Theory and application to geothermal systems», *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 104, n.º B9, pp. 20033-20048, sep. 1999, doi: 10.1029/1999JB900090.
- [4] E. S. Sprunt, T. B. Mercer, y N. F. Djabbarah, «Streaming potential from multiphase flow», *GEOPHYSICS*, vol. 59, n.º 5, pp. 707-711, may 1994, doi: 10.1190/1.1443628.
- [5] A. Revil, M. Darot, y P. A. Pezard, «From surface electrical properties to spontaneous potentials in porous media», *Surv. Geophys.*, vol. 17, n.º 3, pp. 331-346, may 1996, doi: 10.1007/BF01904047.
- [6] A. Revil y A. Jardani, *The Self-Potential Method: Theory and Applications in Environmental Geosciences*, 1.ª ed. Cambridge University Press, 2013. doi: 10.1017/CBO9781139094252.
- [7] C. E. Corry, «Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization», *GEOPHYSICS*, vol. 50, n.º 6, pp. 1020-1034, jun. 1985, doi: 10.1190/1.1441967.
- [8] A. Biswas, «A review on modeling, inversion and interpretation of self-potential in mineral exploration and tracing paleo-shear zones», *Ore Geol. Rev.*, vol. 91, pp. 21-56, dic. 2017, doi: 10.1016/j.oregeorev.2017.10.024.

- [9] L. Eppelbaum y B. Khesin, *Geophysical Studies in the Caucasus*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. doi: 10.1007/978-3-540-76619-3.
- [10] L. V. Eppelbaum, «Review of Processing and Interpretation of Self-Potential Anomalies: Transfer of Methodologies Developed in Magnetic Prospecting», *Geosciences*, vol. 11, n.º 5, p. 194, abr. 2021, doi: 10.3390/geosciences11050194.
- [11] M. Elhussein, «A Novel Approach to Self-potential Data Interpretation in Support of Mineral Resource Development», *Nat. Resour. Res.*, vol. 30, n.º 1, pp. 97-127, feb. 2021, doi: 10.1007/s11053-020-09708-1.
- [12] J. E. Nyquist y C. E. Corry, «Self-potential: The ugly duckling of environmental geophysics», *Lead. Edge*, vol. 21, n.º 5, pp. 446-451, may 2002, doi: 10.1190/1.1481251.
- [13] M. Sato y H. M. Mooney, «THE ELECTROCHEMICAL MECHANISM OF SULFIDE SELF-POTENTIALS», *GEOPHYSICS*, vol. 25, n.º 1, pp. 226-249, feb. 1960, doi: 10.1190/1.1438689.
- [14] R. Doherty, B. Kulesa, A. S. Ferguson, M. J. Larkin, L. A. Kulakov, y R. M. Kalin, «A microbial fuel cell in contaminated ground delineated by electrical self-potential and normalized induced polarization data», *J. Geophys. Res.*, vol. 115, p. G00G08, jul. 2010, doi: 10.1029/2009JG001131.
- [15] V. Naudet, «A sandbox experiment to investigate bacteria-mediated redox processes on self-potential signals», *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, n.º 11, p. L11405, 2005, doi: 10.1029/2005GL022735.
- [16] D. Ntarlagiannis, E. A. Atekwana, E. A. Hill, y Y. Gorby, «Microbial nanowires: Is the subsurface “hardwired”?», *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, n.º 17, p. L17305, sep. 2007, doi: 10.1029/2007GL030426.
- [17] A. Revil *et al.*, «Inner structure of La Fossa di Vulcano (Vulcano Island, southern Tyrrhenian Sea, Italy) revealed by high-resolution electric resistivity tomography coupled with self-potential, temperature, and CO₂ diffuse degassing measurements», *J. Geophys. Res.*, vol. 113, n.º B7, p. B07207, jul. 2008, doi: 10.1029/2007JB005394.
- [18] S. J. Pirson, «THE NEGLECTED SP CURVE», p. 16.
- [19] D. Jougnot y N. Linde, «Self-Potentials in Partially Saturated Media: The Importance of Explicit Modeling of Electrode Effects», *Vadose Zone J.*, vol. 12, n.º 2, p. vzj2012.0169, may 2013, doi: 10.2136/vzj2012.0169.
- [20] R. F. Corwin, «Data quality for engineering self-potential surveys», p. 24.
- [21] A. Aziz, T. Attia, Y. Hamed, y T. Selim, «Visualizing Subsoil Structure for Evaluating the Efficiency of Mole Drain in Heavy Clay Soils Using Geo-electrical Methods», In Review, preprint, abr. 2022. doi: 10.21203/rs.3.rs-1390237/v1.
- [22] B. J. Minsley, J. Sogade, y F. D. Morgan, «Three-dimensional self-potential inversion for subsurface DNAPL contaminant detection at the Savannah River Site, South Carolina: SELF-POTENTIAL INVERSION FOR SUBSURFACE DNAPL», *Water Resour. Res.*, vol. 43, n.º 4, abr. 2007, doi: 10.1029/2005WR003996.
- [23] V. Naudet, «Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater», *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, n.º 21, p. 2091, 2003, doi: 10.1029/2003GL018096.
- [24] V. Naudet, A. Revil, E. Rizzo, J.-Y. Bottero, y P. Bégassat, «Groundwater redox conditions and conductivity in a contaminant plume from geoelectrical investigations», *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 8, n.º 1, pp. 8-22, feb. 2004, doi: 10.5194/hess-8-8-2004.
- [25] T. Arora, N. Linde, A. Revil, y J. Castermant, «Non-intrusive characterization of the redox potential of landfill leachate plumes from self-potential data», *J. Contam. Hydrol.*, vol. 92, n.º 3-4, pp. 274-292, jul. 2007, doi: 10.1016/j.jconhyd.2007.01.018.
- [26] N. Linde y A. Revil, «Inverting self-potential data for redox potentials of contaminant plumes», *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, n.º 14, p. L14302, jul. 2007, doi: 10.1029/2007GL030084.

- [27] S. A. Forté y L. R. Bentley, «Mapping Degrading Hydrocarbon Plumes with Self Potentials: Investigation on Causative Mechanisms using Field and Modeling Data», *J. Environ. Eng. Geophys.*, vol. 18, n.º 1, pp. 27-42, mar. 2013, doi: 10.2113/JEEG18.1.27.
- [28] V. Giampaolo *et al.*, «Self-potential monitoring of a crude oil-contaminated site (Trecate, Italy)», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 21, n.º 15, pp. 8932-8947, ago. 2014, doi: 10.1007/s11356-013-2159-y.
- [29] T. H. Christensen, P. L. Bjerg, S. A. Banwart, R. Jakobsen, G. Heron, y H.-J. Albrechtsen, «Characterization of redox conditions in groundwater contaminant plumes», *J. Contam. Hydrol.*, vol. 45, n.º 3-4, pp. 165-241, oct. 2000, doi: 10.1016/S0169-7722(00)00109-1.
- [30] M. Abbas *et al.*, «Redox potential distribution of an organic-rich contaminated site obtained by the inversion of self-potential data», *J. Hydrol.*, vol. 554, pp. 111-127, nov. 2017, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.08.053.
- [31] W. A. Sauck, «A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments», *J. Appl. Geophys.*, vol. 44, n.º 2-3, pp. 151-165, may 2000, doi: 10.1016/S0926-9851(99)00021-X.
- [32] W. A. Sauck, «A Conceptual Model for the Geoelectrical Response of LNAPL Plumes in Granular Sediments», p. 13.
- [33] C. Yang, C. Yu, y S. Su, «High resistivities associated with a newly formed LNAPL plume imaged by geoelectric techniques - a case study», *J. Chin. Inst. Eng.*, vol. 30, n.º 1, pp. 53-62, ene. 2007, doi: 10.1080/02533839.2007.9671230.
- [34] A. L. Endres y J. D. Redman, «Modelling the Electrical Properties of Porous Rocks and Soils Containing Immiscible Contaminants», *J. Environ. Eng. Geophys.*, vol. 1, n.º B, pp. 105-112, ene. 1996, doi: 10.4133/JEEG1.B.105.
- [35] O. Kaufmann y J. Deceuster, «A 3D Resistivity Tomography Study of a LNAPL Plume Near a Gas Station at Brugelette (Belgium)», *J. Environ. Eng. Geophys.*, vol. 12, n.º 2, pp. 207-219, jun. 2007, doi: 10.2113/JEEG12.2.207.
- [36] V. Che-Alota, E. A. Atekwana, E. A. Atekwana, W. A. Sauck, y D. D. Werkema, «Temporal geophysical signatures from contaminant-mass remediation», *GEOPHYSICS*, vol. 74, n.º 4, pp. B113-B123, jul. 2009, doi: 10.1190/1.3139769.

En Barcelona, a 1 de julio de 2022

Firmado:



Pilar Queralt Capdevila

Catedrática de Física de la Tierra



Juanjo Ledo Fernández

Catedrático de Física de la Tierra



Àlex Marcuello Pascual

Catedrático de Física de la Tierra