

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SOBRE MÉTODOS ELÉCTRICOS PARA LA SOLICITUD DE UN ESTUDIO GEOFÍSICO PARA NUEVAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS

Joaquín Dorronsoro¹ & Christian Merino¹

¹Departamento de Geofísica Aplicada. Orbis Terrarum Projects.

RESUMEN

Las plantas fotovoltaicas son instalaciones que normalmente ocupan una gran superficie de terreno. Esto puede dar lugar a que las condiciones geológicas y geotécnicas cambien dentro de una misma planta. Por este motivo es necesario un correcto diseño de la campaña geofísica que reduzca las incertidumbres geológicas. Por esta razón se pretenden detallar las aplicaciones de los métodos eléctricos y otras metodologías geofísicas con la intención estandarizar el número de ensayos a ejecutar dentro de una campaña de reconocimiento. Sin estas metodologías, el número de investigaciones directas sería mayor y por tanto se evidenciaría un sobrecoste en la campaña. En este artículo se aportan recomendaciones que se basan en la amplia experiencia del Departamento de Geofísica Aplicada de Orbis Terrarum en estudios geofísicos para plantas fotovoltaicas en los 5 continentes.

Palabras clave: Plantas fotovoltaicas, energías renovables, geofísica, métodos eléctricos, tomografía de resistividad eléctrica, corrosividad.

ABSTRACT

Photovoltaic plants are facilities that typically occupy a large area of land. This can result in geological and geotechnical conditions changing within the same plant. For this reason, a correct design of the geophysical campaign is necessary to reduce geological uncertainties. Thus, it is intended to detail the applications of electrical methods and other geophysical methodologies with the intention of standardising the number of investigations to be carried out within a geophysical survey. In this sense, without these methodologies, the number of direct investigations would be higher and, consequently, there would be an additional cost overrun in the campaign. This article provides recommendations based on the extensive experience of the Applied Geophysics Department of Orbis Terrarum in geophysical studies for photovoltaic plants on all continents.

Keywords: Photovoltaic plants, renewable energy, geophysics, electrical methods, electrical resistivity tomography, corrosivity.

1. INTRODUCCIÓN

Se redacta el presente documento con el objeto de recomendar y estandarizar la metodología correcta para el diseño de una campaña de investigación geofísica para nuevas plantas fotovoltaicas. Estas recomendaciones se basan en: (1) la experiencia del Departamento de Geofísica Aplicada de Orbis Terrarum (www.orbisgeofisica.com), (2) en las especificaciones técnicas publicadas por Puell y López (2021) para la solicitud de un estudio geológico-geotécnico en plantas fotovoltaicas (www.orbisterrarum.es) y, (3) en la trayectoria de investigación de más de 500 plantas solares en diversas regiones del mundo y más de 50 GW construidos.

La optimización de costes y plazos es un factor clave en el tipo de investigaciones propuestas. Siempre es necesario un buen estudio geofísico que acompañe al proyecto de una planta solar fotovoltaica para facilitar datos válidos para el diseño y así evitar riesgos y problemas a largo plazo durante la operación de la planta Puell y López (2021).

Las aplicaciones de los métodos eléctricos para un estudio geofísico complementario al geotécnico se deben centrar en los siguientes aspectos:

- (i) Caracterizar el sustrato a partir de modelos geoelectricos.
- (ii) Analizar el potencial de corrosión del suelo a los aceros.
- (iii) Aportar datos de resistividad eléctrica para el diseño de la red de puesta a tierra.
- (iv) Localizar, en caso de existir, la posición del nivel freático.
- (v) Detectar rellenos antrópicos, cavidades y/o posibles contaminaciones del terreno.

En ocasiones estos estudios se deberán completar con estudios geofísicos adicionales en los que se caractericen otras propiedades físicas o bien investigaciones específicas de líneas de transmisión, subestaciones eléctricas o caminos de acceso hasta la planta. Todos estos, generalmente, están sujetos a algún tipo de regulación local.

2. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL TERRENO

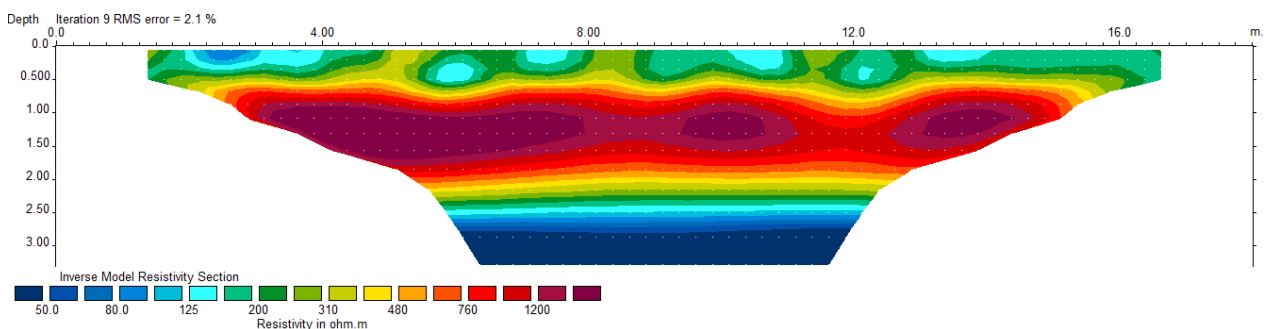
2.1. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

Se destaca como la investigación más habitual y completa, se utiliza un dispositivo Wenner o Schlumberguer de 21 o 42 electrodos equidistantes a lo largo de una línea para determinar la resistividad eléctrica del terreno en dos dimensiones. La interpretación de estos resultados permite realizar una representación de las diferentes unidades geológicas en una sección bidimensional, además de identificar niveles freáticos, delimitar contaminantes, cavidades y/o rellenos antrópicos y clasificar el parámetro penalizante Z_2 para configurar la corrosividad del suelo (DIN 50 929-3).



(a) Disposición en campo

(b) Disposición en campo



(c) Perfil procesado de resistividad eléctrica

Figura 1: Caracterización geoelectrica mediante la ejecución de tomografías eléctricas.

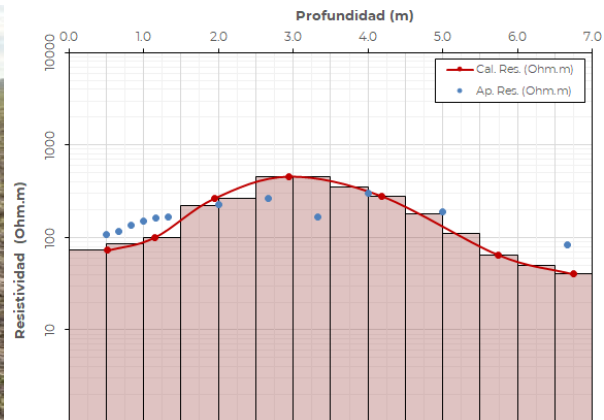
2.2. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Otra opción para realizar una caracterización geoelectrica es a través de ensayos SEV (Sondeos Eléctricos Verticales) diseñando dispositivos tetraelectródicos con diferentes aperturas, esto permite determinar la resistividad eléctrica en un solo punto a diferentes profundidades, comúnmente se practican dispositivos tipo Wenner (ASTM G57-20) o Schlumberger por su rápido diseño. Para el procesado se ejecutan inversiones de los valores de resistividad medidos en campo (aparente) y luego se transforman en curvas unidimensionales con los parámetros de resistividad verdadera.

Esta técnica ha sido superada por la tomografía eléctrica ya que esta última tiene la ventaja de poder realizar una interpretación geológica de una mayor superficie.



(a) Disposición en campo

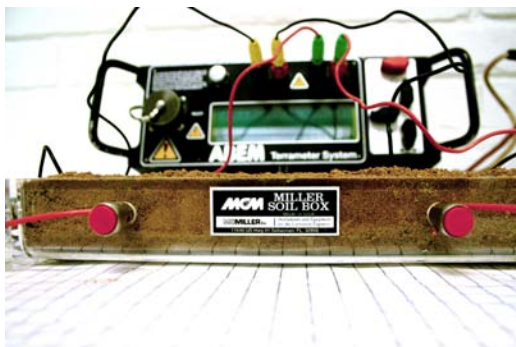


(b) ρ_a y ρ_v vs profundidad

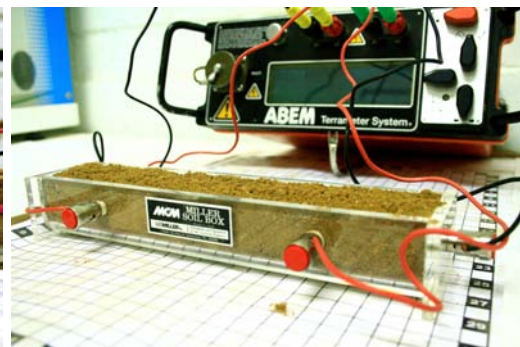
Figura 2: Caracterización geoelectrica del terreno mediante la ejecución de SEV's.

2.3. SOIL-BOX

La medición de la resistividad eléctrica también puede ser realizada en el laboratorio utilizando el método de dos electrodos conocido como Soil-Box. La medición se realiza sobre muestras compactadas que se saturan con agua destilada. Los resultados se muestran en forma de curvas en las que se expone la resistividad medida a diferentes porcentajes de humedad. Este método es el recomendado para la clasificación del potencial de corrosión según normativa estadounidense (ASTM G187-18) y se aplica también para plantas que necesiten complementar la norma DIN 50 929 (2018) en fases posteriores (Pull Out Test, relleno de zanjas,...).



(a)



(b)

Figura 3: Caracterización geoelectrica de una muestra mediante la ejecución del Soil-Box.

3. GUÍA PARA DISEÑO

La ecuación (1) determina el comportamiento mínimo de las investigaciones sobre resistividad eléctrica que se deben realizar en base a la experiencia de Orbis Terrarum. Esta familia de curvas se explica en función del área a estudiar y la pendiente media del terreno tal y como se expresa en la figura 4.

Esta relación se ha inferido a partir del análisis de más de 500 plantas investigadas por Orbis. Se destaca la influencia de la topografía en el modelo adquirido y se puede señalar la susceptibilidad que esta última aporta a una campaña geofísica, pues se demuestra su directa proporcionalidad sobre cambios en el terreno (erosión, zonas de flujo preferente, distribución de la vegetación, cambios laterales y verticales de facies,...).

$$N = \sqrt{S \cdot P_m} \quad ; \quad N(S, P_m) : \{N(S, P_m) \in \mathbb{N} \wedge (S, P_m) \in \mathbb{R}^+ | (S \cdot P_m) > 0\} \quad (1)$$

Siendo:

- N = Número de ensayos.
- S = Superficie (Ha).
- P_m = Pendiente media.

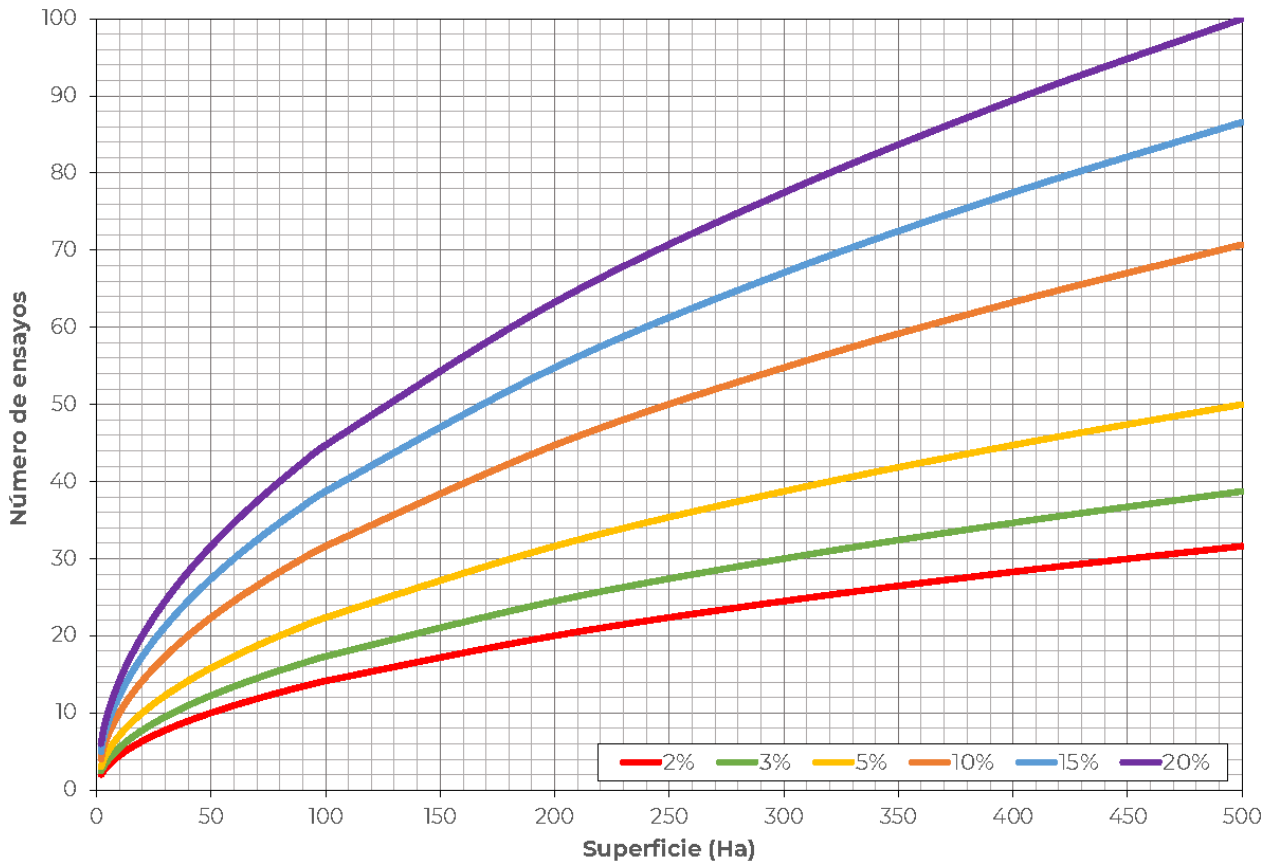


Figura 4: Número de ensayos en función de la superficie a investigar y su pendiente media.

En la tabla 1 se muestra el número de ensayos a ejecutar (N) para pendientes medias del 2%, 3%, 5%, 10%, 15% y 20% en la que se evidencia, por ejemplo, como un 2% se considera homogéneo y un 20% arroja una mayor cantidad de investigaciones como efecto de la irregularidad del terreno.

Tabla 1: Número de investigaciones recomendadas según el tamaño y la pendiente de la planta.

Superficie (Ha)	Pendiente (%)					
	≤2	≤3	≤5	≤10	≤15	≤20
2	2	2	3	4	5	6
5	3	4	5	7	9	10
10	4	5	7	10	12	14
30	8	9	12	17	21	24
50	10	12	16	22	27	32
100	14	17	22	32	39	45
300	24	30	39	55	67	77
400	28	35	45	63	77	89
500	32	39	50	71	87	100

Como referencia, a la hora de estimar las investigaciones en una parcela en la que no se han analizado las pendientes, se recomienda adoptar un valor del 3%, aunque, dependiendo de la heterogeneidad de la zona (geología local, contaminación, presencia del nivel freático, cavidades y/o rellenos antrópicos, accesos, instalaciones...) el número de investigaciones se debe incrementar al siguiente nivel de la tabla 1, en este caso un 5%.

Toda investigación debe ser supervisada continuamente por un técnico especializado (Geofísico/ Geólogo o similar con experiencia) conocedor de las necesidades del cliente y detalles del proyecto.

4. INFORMES

El objeto del informe de resultados se centra en el procesado e interpretación del método eléctrico seleccionado con el objetivo de establecer los valores de resistividad del terreno. Con esto se permite, por una parte, confirmar el modelo geológico de la zona y, por otra, evaluar los valores de resistividad del terreno para el correcto diseño de la red puesta a tierra. Además, se identifica el potencial de corrosión del terreno para determinar su agresividad frente a los materiales metálicos enterrados.

Los datos mínimos a entregar al cliente son los siguientes:

- (i) Plano de situación de las investigaciones geofísicas.
- (ii) Perfiles geoelectrónicos procesados (tomografía eléctrica) o en su defecto curvas 1D de resistividad verdadera (SEV).
- (iii) Distribución del factor Z_2 en función de la resistividad del terreno según DIN 50 929-3 (2018).
- (iv) Catálogo de la resistividad calculada en función de la profundidad y apertura de los electrodos para el correcto diseño de la red puesta a tierra (mínimo 6,50 m de investigación).
- (v) Mapas de distribución de la resistividad en el área donde se construirá la nueva PFV y la subestación eléctrica a cuatro profundidades diferentes: 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m y 2,0 m (ver figura 5).

Este producto también se puede construir mediante la implementación de técnicas electromagnéticas en el dominio de la frecuencia, con la ventaja de que estos últimos se caracterizan por su rápida ejecución y facilidad para detectar variaciones laterales de resistividad y delimitación de rellenos antrópicos y/o contaminantes.

- (vi) Dependiendo de la zona donde se ubique la futura PFV y en función de las especificaciones del cliente, se deben ejecutar otras metodologías geofísicas para la determinación de los diferentes parámetros que se explican en la sección 5.

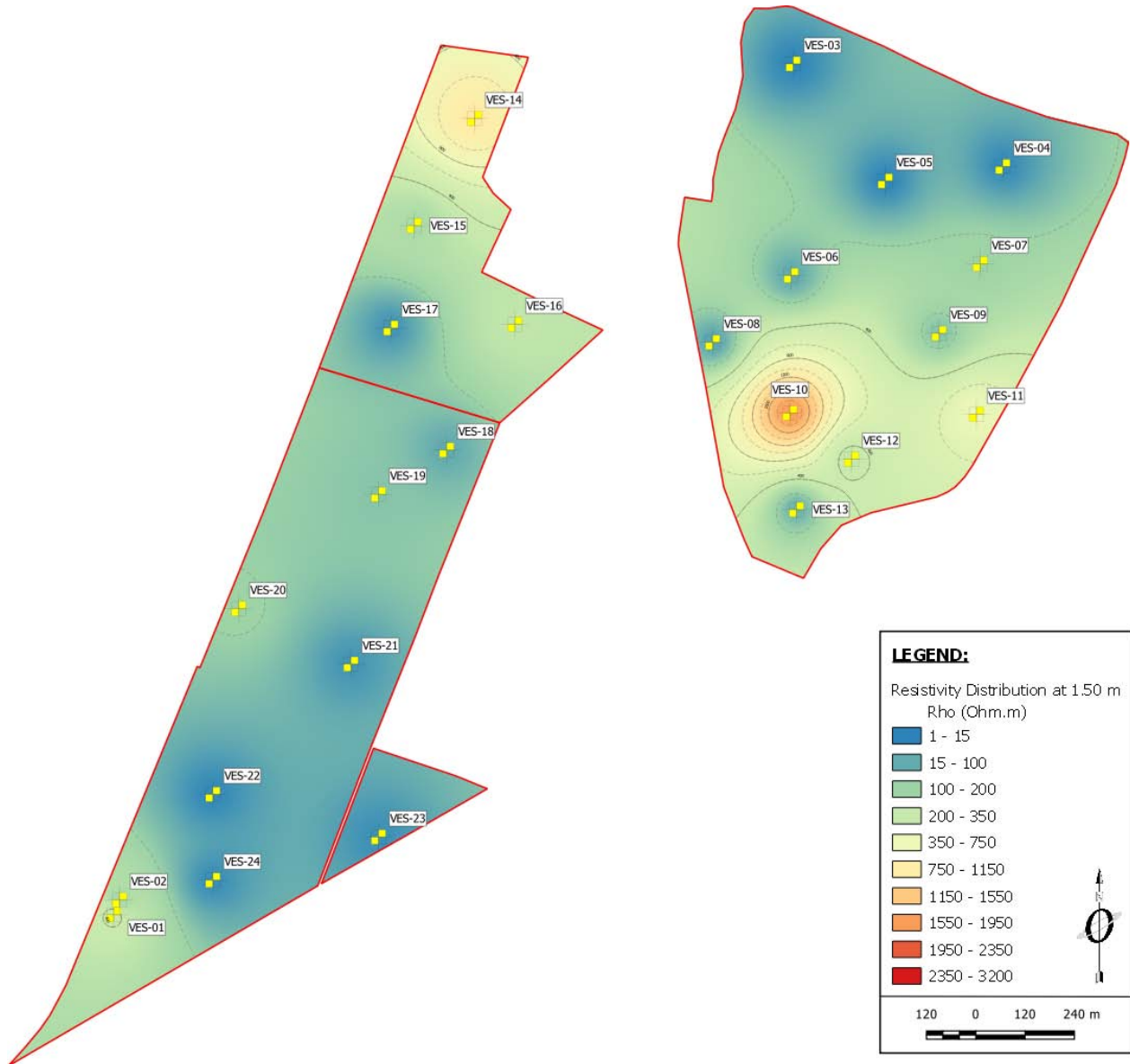


Figura 5: Distribución de la resistividad eléctrica del terreno a una profundidad determinada.

PLAZOS

Los plazos habituales que se contempla en este tipo de estudio, aunque es variable en función de los métodos geofísicos que se apliquen y del tamaño del área a investigar, comúnmente son de 1 semana para los reconocimientos de campo y de 1 semana más para la redacción y procesado del informe final para una planta de unos 100 MW.

5. OTRAS TÉCNICAS GEOFÍSICAS A EMPLEAR

Dependiendo de la ubicación geográfica de la nueva Planta Fotovoltaica y en función de las regulaciones locales, especificaciones del cliente, dificultad del proyecto y peligrosidad sísmica, se deben tomar en cuenta las siguientes técnicas geofísicas:

- (i) Sísmica de refracción para modelar el terreno en función de la velocidad de onda P (V_P) y

con esto caracterizar la excavabilidad o bien las propiedades mecánicas del macizo rocoso. Esta técnica se destaca por su rápida ejecución y profundidad de investigación para estimar modelos geológicos que permiten delimitar zonas excavables, ripables y volables (ver figura 6).

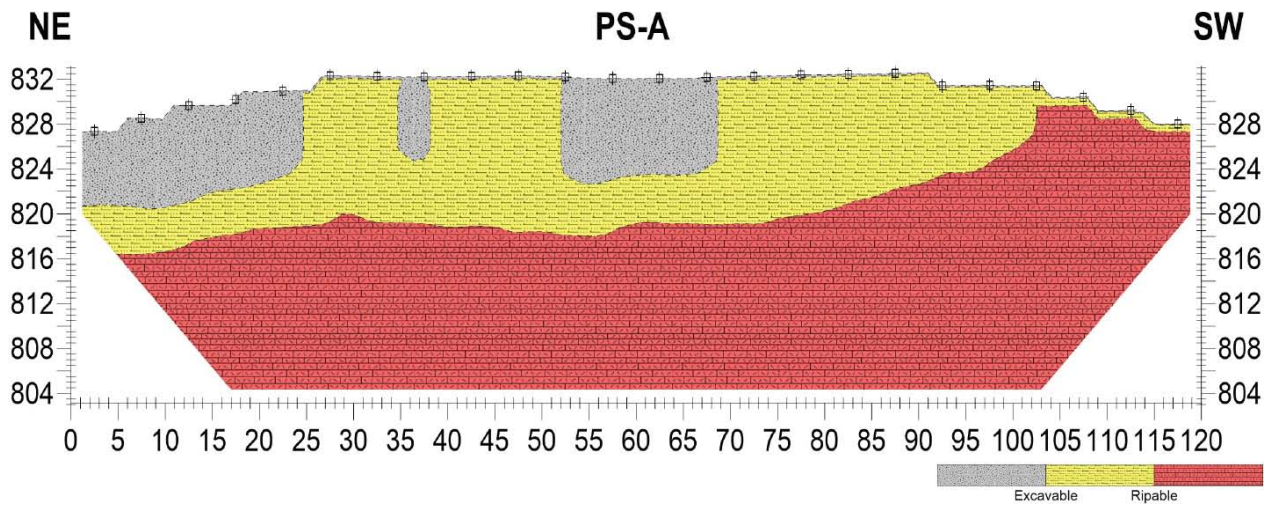


Figura 6: Perfil de distribución de áreas excavables, ripables y volables de un perfil de sísmica de refracción.

- (ii) Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) o refracción de microtremores (ReMi) para el cálculo de la velocidad de onda S (V_S), caracterización de la V_{S30} y su consecuente clasificación en función de los estándares internacionales del área donde se pretende investigar (Normas sismoresistentes, Eurocódigo, IBC, ...).
Además, las técnicas que estudian las ondas superficiales y su consiguiente análisis espectral se destacan como herramientas eficaces para la determinación de contactos suelo-roca a rangos variables de profundidad.
- (iii) Cálculo de los módulos dinámicos de deformación elástica para rangos de muy baja deformabilidad (E_0 , G_0 , K_0 y ν) utilizando técnicas combinadas de V_P y V_S como sísmica de refracción y MASW o ReMi, crosshole (Dorronsoro y Merino, 2019) y downhole.
- (iv) Aplicación del método del cociente espectral HVSR o técnica de Nakamura para el cálculo de la frecuencia fundamental del terreno en zonas sísmogénicas activas (efecto de sitio).
- (v) Registro de vibraciones para el cálculo de espectros de respuesta.
- (vi) Utilización del georadar para la detección de servicios enterrados.
- (vii) Ejecución de métodos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia como respuesta rápida, fiable y eficiente para el cálculo de la resistividad eléctrica en casos concretos en los que no se puedan hincar electrodos al terreno, en zonas en los que el sustrato rocoso se encuentre aflorante o aquellos en los que no existe un contacto óptimo entre los pines y el terreno (arenas eólicas).

Del mismo modo, esta técnica se muestra como una de las más efectivas para la distinción de variaciones laterales de resistividad y delimitación de rellenos antrópicos, cavidades karsticas y/o plumas de contaminación.

Debe tomarse en cuenta la importancia de conocer las normativas locales y evaluar la peligrosidad sísmica del área de estudio donde se pretenda construir la nueva planta fotovoltaica, con el fin de emplear múltiples técnicas geofísicas que aporten un mayor soporte al estudio geotécnico y de esta forma se caracterice el terreno en función de las propiedades acústicas, resistivas o registros de vibración.

Para más información visita www.orbisgeofisica.com

REFERENCIAS

- (ASTM International, 2018). *Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Two-Electrode Soil Box Method (ASTM G187-18)*. ASTM International: <https://www.astm.org/>.
- (ASTM International, 2020). *Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method (ASTM G57-20)*. ASTM International: <https://www.astm.org/>.
- (Deutsches Institut für Normung, 2018). *Corrosion of metals - Corrosion likelihood of metallic materials when subject to corrosion from the outside - Part 3: Buried and underwater pipelines and structural components (DIN 50929-3)*. Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN): <https://www.din.de/en>.
- Dorronsoro, J. y Merino, C. (2019). Estudio del efecto de mejora del terreno con inyecciones por tubo manguito en un terraplen ferroviario a partir del análisis de los módulos dinámicos utilizando el método sísmico de pozo cross-hole. *Orbis Terrarum Projects* (www.orbisgeofisica.com), (1):1–9.
- Puell, F. y López, J. A. (2021). Nuevas especificaciones técnicas para la solicitud de un estudio geológico-geotécnico en plantas fotovoltaicas. *Orbis Terrarum Projects* (www.orbisterrarum.es), (1):1–11.