

La investigación geofísica en los estudios de balsas de relaves: su aplicación e inclusión en el ACUERDO N° MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM de la República de Ecuador

Geophysical research in tailings pond studies: its application and inclusion in N° MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM AGREEMENT of the Republic of Ecuador

Alonso-Pandavenes, Olegario; Andrade-Mendoza, Carlos; Torrijo-Echarri, Francisco Javier

 Olegario Alonso-Pandavenes
geotecnia2015@gmail.com
GEOTOP Ecuatorial, Quito, Ecuador

 Carlos Andrade-Mendoza
caandradem@uce.edu.ec
Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador

 Francisco Javier Torrijo-Echarri
fratorec@trr.upv.es
Universitat Politècnica de València, Valencia, España

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo
Universidad Central del Ecuador, Ecuador
ISSN: 1390-7042
ISSN-e: 2602-8484
Periodicidad: Semestral
vol. 16, núm. 2, 2023
revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 02 Abril 2023
Aprobación: 30 Junio 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/624/6244272004/>

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4488>

Autor de correspondencia: geotecnia2015@gmail.com

Cómo citar: Alonso-Pandavenes, O., Andrade-Mendoza, C., & Torrijo-Echarri, F. J. (2023). La investigación geofísica en los estudios de balsas de relaves: su aplicación e inclusión en el ACUERDO N° MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM de la República de Ecuador. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 16(2), 39-57. <https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4488>

Resumen: La aplicación de las técnicas geofísicas en la investigación de la obra civil, como el estudio de las presas de relaves mineras en todas sus fases, ha sido actualizada en Ecuador con el ACUERDO N° MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM y su Anexo II. Se realiza una revisión de las mismas, su utilidad y los parámetros que aportan para cada parte de la construcción de una balsa de relaves mineros. Se hace una revisión también de las que han sido incluidas en el Acuerdo Ministerial y la posibilidad de incluir más técnicas que las que se indican en dicha normativa. Se concluye con la importancia de estas técnicas en la investigación complementaria previa y en el monitoreo durante la vida y cierre del repositorio y la solución de problemas geotécnicos variados. También se recomienda un análisis y la inclusión de más técnicas de investigación geofísica en este Acuerdo Ministerial y en la normativa minera de Ecuador.

Palabras clave: geofísica, balsas de relaves, acuerdo MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM, minería.

Abstract: The application of geophysical techniques in the investigation of civil works, such as the study of mining tailings dams in all its phases, has been updated in Ecuador with N° MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM AGREEMENT, and its Annex II. A review of them, their usefulness, and the parameters they provide for each part of constructing a mining tailings pond are carried out. A review is also made of those that have been included in the Ministerial Agreement and the possibility of including more techniques than those indicated in said regulations. It concludes with the importance of these techniques in the previous complementary investigation, monitoring during the life and closure of these repositories and the solution of various geotechnical problems. An analysis including more geophysical investigation techniques in this Ministerial Agreement and Ecuador's mining regulations is also recommended.

Keywords: geophysics, tailings ponds, MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM agreement, mining.

INTRODUCCIÓN

La minería genera grandes volúmenes de materiales residuales como consecuencia de la explotación y tratamiento de los recursos mineros de forma inevitable, ya que los minerales de interés son solo un porcentaje muy reducido de la extracción y aprovechamiento (menos de un 1%). Las balsas de relaves son, por lo tanto, elementos inherentes a la actividad minera y de gran importancia (SERNAGEOMIN, 2022). Según Gómez-Ortiz y Martín-Crespo (2010), son lugares de acumulación de los materiales derivados de los procesos de metalurgia de las menas metálicas, incluidos los descartes de la extracción (ganga) y los restos de concentrados no útiles de la mena. Por lo tanto, están constituidas por materiales de granulometría fina a media (y en ocasiones gruesos) que contienen rechazos del tratamiento mineral transportados y depositados en fase seca o acuosa.

Las balsas de relaves constan de dos partes fundamentales: la presa, muro o dique y el vaso (Ver Figura 1). La primera es la más importante (y donde se centran la mayoría de estudios), ya que constituye el contrafuerte que limita la zona cerrada donde se depositarán los residuos mineros. El vaso es toda la superficie donde los sedimentos serán acumulados, pero no carece de importancia ya que puede ser una puerta de salida a lixiviados o fluidos por filtración. La superficie de apoyo de ambos elementos es común y precisa de un estudio detallado antes de proceder a su empleo (Sernageomin, 2022).

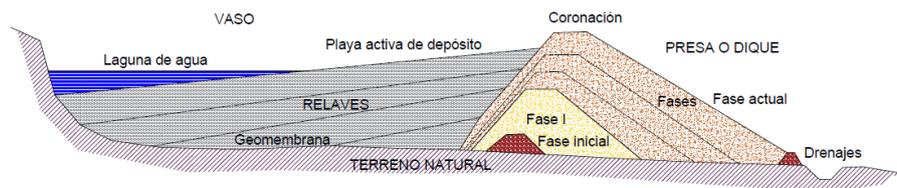


FIGURA 1
Esquema simplificado de una presa de relaves construida “aguas abajo”
Modificado de Sernageomin, 2022

Los depósitos de relaves han sido protagonistas destacados en las roturas de presas (incluyendo las hidráulicas; Stachan y Goodwin, 2015) y produciendo desastres importantes, los cuales, en los últimos años parecen decrecer (Ver Figura 2A). Por lo tanto, la investigación y seguimiento de las labores tanto de diseño como de construcción y cierre son fundamentales frente a los riesgos que representan para el medioambiente y las poblaciones cercanas (Rico et al., 2008). En Ecuador se han dado varios casos de roturas de balsas de pequeño tamaño, como por ejemplo la sucedida en el cantón Camilo Ponce Enríquez (Ver Figura 2B) en el pasado 2020 (Rhon Dávila, 2020).

NOTAS DE AUTOR

geotecnia2015@gmail.com

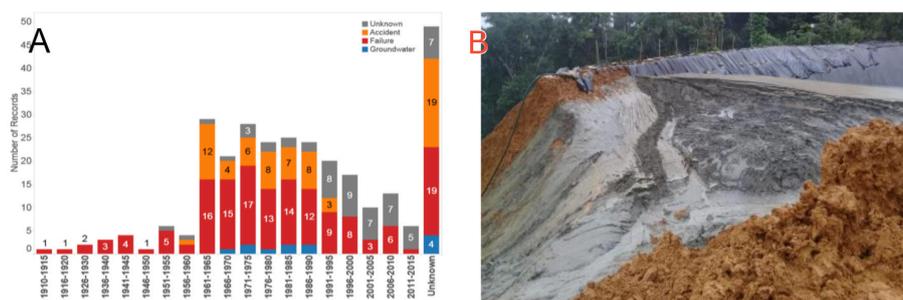


FIGURA 2

(A) Histórico de rotura por años y tipo. (B) Rotura de presa de relaves en Camilo Ponce Enríquez en el 2020, Ecuador.
a) Tomado de Strachan y Goodwin (2015). b) Tomado de Rhon Dávila (2020).

En el año 2020, el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR) de la República de Ecuador aprobó el Acuerdo N° MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM (en adelante AM-43) cuyo objeto es el de “establecer los procedimientos administrativos y condiciones técnicas para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y mantenimiento de Depósitos de Relaves en los cuales se depositen residuos metalúrgicos provenientes de concesiones mineras en los regímenes de mediana minería y minería a gran escala a nivel nacional”, de aplicación a nivel nacional en regímenes de minería a mediana y gran escala.

Según este Acuerdo, un depósito de relaves o relavera es una “obra que permite almacenar los relaves provenientes de la fase de beneficio de toda actividad minera, contenidos en una obra estructurada en forma segura y de carácter permanente”. También se considera que la construcción del depósito impida el flujo de su contenido fuera de sus límites y que el agua (y los posibles lixiviados) disponga de un sistema de recirculación de acuerdo a la normativa ambiental vigente. En el Anexo II al mencionado AM-43: “Guía Técnica para la Presentación de Proyectos de Diseño de los Depósitos de Relaves”, se contempla un instructivo para la aprobación de dichos proyectos en relación a su Art. 35.

Los métodos y técnicas geofísicas son utilizadas con la finalidad de obtener información, de forma complementaria, de la estructura del subsuelo, determinación de propiedades ingenieriles del terreno in-situ, determinar profundidades de niveles freáticos y el basamento rocoso (USACE, 1995). Además, según la misma publicación, contribuyen en gran medida a dar solución a problemas geológicos, geotécnicos y medioambientales, basándose en el contraste de las propiedades indirectas medidas. Sin embargo, la medida de parámetros indirecta y la variabilidad del terreno precisan de modelizar y partir de asunciones geológicas ambiguas, en algunos casos, que generan soluciones o modelos ilimitados. Sin embargo, siendo herramientas de investigación complejas son insustituibles en la resolución y complementación de las investigaciones directas (USACE, 1995).

MÉTODOS

Investigaciones geofísicas en la exploración geológico-geotécnica del terreno

Los métodos geofísicos aplicables a la investigación geológica y geotécnica se centran en los relacionados con la aplicación de un campo artificial: sísmicos, eléctricos y electromagnéticos. Dentro de éstos existen también técnicas de investigación de campo natural aplicables a algún tipo de investigación como el potencial espontáneo (IP) en el flujo de acuíferos (CEDEX, s.f.), sin embargo, estos métodos de campo natural no suelen disponer de la precisión suficiente como para ser empleados en la investigación geotécnica (son cualitativos, principalmente).

A continuación, se procederá a describir y relatar brevemente estos métodos y alguna de sus técnicas más apropiadas al estudio de la implantación de las balsas de relaves y la geotecnia, haciendo una revisión de los mismos representada en la Tabla 1. Se indica, como referencia, el parámetro físico que se mide en su aplicación, el cual será el que se relacione con materiales o propiedades del terreno. Asociada a cada técnica se indica los tipos de dispositivos o arreglos (forma o disposición de los equipos de medida en el terreno para aplicar la técnica) más usados o comunes en cada una de las técnicas descritas, su aplicación general a problemas o estudios de investigación óptimos o con mejores resultados y algunos comentarios relativos a la ejecución de los ensayos (Reynolds, 1997; Telford et al., 1990; USACE, 1995).

TABLA 1
Resumen de investigaciones geofísicas aplicadas a geotécnica y geología

Método	Técnica	Parámetro	Dispositivo	Aplicación	Observaciones
Sísmico	Reflexión	TWT (tiempo)	Perfil 2D	Estructura geológica, fallas	Valor económico alto
	Refracción	Vp Vs*	Perfil 2D	Rellenos, basamento, ripabilidad, estratigrafía	(*) La Vs es compleja de obtener en superficie
	SASW	Aceleración, Vs	Línea corta	Vs en zonas superficiales	Aplicable hasta 10 a 20 m máximo
	MASW	Vs	Perfil 1D	Distribución de la Vs, Vs30	Buena resolución superficial, útil hasta 40 m
	ReMi	Vs	Perfil 1D	Distribución de la Vs, Vs30	Resolución media hasta más de 150 m
	MAM	Vs	Geométrico	Distribución de la Vs	Resolución baja en superficie, hasta 300 m
	HVSR	fo	Estación	Periodo de vibración (ω Distribución de la Vs?)	La inversión no ofrece resultados fiables en Vs
	SPAC	Vs	Geométrico	Distribución de la Vs	Resolución baja en superficie, hasta 500 m
Eléctrico	UP - Down - Cross Hole	Vp y/o Vs**	Pozo o sondeo habilitado	Distribución de Vs y Vp, Módulos elásticos dinámicos	(**) La Vs solamente en Down-hole. Valores en la vertical (sondeo)
	SEV	Resistividad	Estación	Estratigrafía, acuíferos, humedad, basamento	En distribución vertical (como un sondeo)
	Calicatas	Resistividad	Alineación	Cambios laterales facies	En la horizontal
	Tomografía	Resistividad	Perfil 2D	Estratigrafía, acuíferos, humedad, huecos, basamento	Sobre el perfil involucrado (sin datos en los extremos)
	SP	Potencial (Volt)	Alineación	Flujo de agua	Valores puntuales sobre perfil
E.m.	Registros en pozo	Voltaje, resistividad	Vertical en pozo	Estudio de sondeos a destroza, acuíferos	Información complementaria a otros datos (perforación)
	FDEM	Resistividad	Móvil	Estudios hidrogeológicos, materiales conductivos (lixiviados)	Fácil y sencillo de aplicación, con problemas de interferencias
	TDEM	Resistividad	Geométrico	Estratigrafía, acuíferos, humedad, basamento	Similar a un SEV, pero en el dominio del tiempo
	Georadar	TWT (tiempo)	Alineación	Servicios enterrados, huecos, geología superficial	Alta resolución hasta 5-10 m, problemas de penetración a más profundidad

Método Sísmico

El método sísmico se basa en el estudio de una onda elástica a lo largo de su trayecto dentro del terreno. Este tipo de análisis se puede realizar desde la perspectiva del dominio del tiempo (técnicas activas) o del dominio de la frecuencia (técnicas pasivas). Dentro de las técnicas activas se encuentran las de reflexión y la de refracción, mientras que en las pasivas encontramos una variedad mayor de técnicas como las pasivas-activas (SASW, MASW y ReMi) y las pasivas-pasivas (MAM, ReMi, HVSR y SPAC).

Sísmica de reflexión

La sísmica de reflexión se basa en la medida de las reflexiones dentro de un material de una onda elástica del tipo compresional (primaria o P). La técnica se emplea en la definición de la estructura del terreno (fallas y estratificación) y precisa de la ejecución conjunta con perfiles de refracción para poder realizar la migración (establecer la profundidad de los reflectores) de los registros. Por este motivo, y por los tipos de equipos a emplear y la necesidad de especialización en la interpretación, suele ser una técnica poco empleada debido a su coste económico de aplicación, principalmente. No obstante, se trata de una técnica, sobre todo la reflexión de alta resolución, muy interesante en la investigación tanto de la zona de la presa como del vaso en las balsas de relaves en relación al establecimiento de la estructura del terreno.

Sísmica de refracción

La técnica de la refracción tiene su principio de aplicación en la refracción crítica de una onda elástica sobre un refractor o interface con cambios en la impedancia sísmica. Es una técnica ampliamente aplicada en estudios de naturaleza civil y medioambiental y se trata de una herramienta fundamental en la definición de la posición del substrato rocoso y el establecimiento de correlaciones con ciertos parámetros del terreno (como la compacidad de los sedimentos, la ripabilidad o la fracturación de las rocas).

Sísmica SASW

Las técnicas de sísmica activa-pasiva como la SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), son técnicas de perfil que ofrecen resultados en 1D. Se basan en el análisis de la señal producida por el paso en el terreno de una onda elástica (superficial, no de cuerpo) en el dominio de la frecuencia (análisis espectral). Esta técnica dispone de un alcance en profundidad limitado con un máximo de 30 m de investigación y alta resolución en los primeros 10 m de prospección. Es recomendada en el estudio de huecos, estructuras y niveles geológicos compactos y superficiales.

Sísmica MASW

Se trata de otra técnica activa-pasiva (medida del ruido ambiental predominantemente) que, en este caso, se basa en un análisis multiespectral de las ondas superficiales (Multichannel Analysis of Surface Waves). Similar a la técnica SASW en los resultados obtenidos, pero en este caso se emplean perfiles más largos (entorno a los 60 m) que permiten alcanzar una profundidad media de unos 40 a 50 m (Park et al., 1999). Es la técnica más empleada y recomendada en la determinación de la V_{s30} en los estudios de sismo resistencia (NEC-SD-DS, 2015).

Sísmica pasiva ReMi

La sísmica pasiva de tipo ReMi (Refraction Microtremor) es de tipo pasiva-pasiva y solo mide el rumor o ruido ambiental en la zona de estudio para, posteriormente, analizar los resultados en función de la distribución de frecuencias. Con respecto a las anteriores ésta permite alcanzar una mayor profundidad (más de 150 m) con un resultado de distribución de la velocidad de la onda de corte también de tipo puntual (1D) asociada al centro del dispositivo aplicado o perfil de geófonos (Louie, 2001).

Sísmica pasiva HVSR

El análisis del cociente espectral entre las componentes horizontal y vertical (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) en un punto de estación mediante un grupo de tres geófonos orientados en las direcciones del espacio es una técnica en desarrollo actualmente que presenta varias aplicaciones interesantes en la

investigación de las balsas de relaves (Nakamura, 1989). Si bien está ampliamente aceptada como una técnica que permite la definición del periodo fundamental de vibración del terreno (T_0), en conjunción con investigaciones directas (sondeos) es posible determinar la posición del substrato rocoso (Alonso-Pandavenes et al., 2022) y estudios de amplificación del terreno (efecto sitio) para análisis de sismo resistencia.

Técnicas en pozo (sondeos)

La investigación de perforaciones, pozos o sondeos suelen ser necesarias cuando la ejecución del mismo se ha realizado empleando técnicas destructivas de avance (percusión y/o rotopercusión). En dichos casos, la auscultación de la perforación permite complementar los resultados de los análisis del ripio recuperado. Las técnicas de ensayo sísmico en pozo comprenden las de up-hole, down-hole y cross-hole, dependiendo del movimiento de los equipos dentro de la perforación. Además, existen otras complementarias que se pueden ejecutar en ensayos in situ como el dilatómetro sísmico (sDMT) y el piezocono sísmico (sCPTu). Se trata de técnicas en 1D, a excepción del cross-hole que es 2D, con medida de la velocidad de la onda de compresión (V_p) y/o la de corte (V_s).

Método Geoeléctrico

El método geoeléctrico está basado en la medida de la resistencia eléctrica a lo largo de una sección (resistividad) cuando aplicamos un campo eléctrico en el terreno. La resistividad, invariante a la geometría de los materiales, permite discriminar materiales con variaciones en la impedancia eléctrica importantes. En contraposición a esta ventaja ésta no está relacionada con parámetros elásticos (geomecánicos) del terreno (Orellana, 1981).

Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

Se trata de la técnica geoeléctrica más conocida y aplicada con éxito en la investigación hidrogeológica, sobre todo. Se basa en la medida en la vertical (sondeo 1D) de la variación de la resistividad de los materiales al paso de una corriente eléctrica. Se suele aplicar mediante dispositivos o arreglos tetraelectródicos (Schlumberger, Wenner o Dipolo-dipolo) o trielectródicos (Polo-dipolo).

La aplicación de esta técnica está indicada en la definición de la estratigrafía de un terreno y el análisis de la humedad (saturación) de los materiales, sobre todo. En relación directa con los cambios de resistividad se puede establecer también la posición del substrato rocoso o variaciones en las condiciones estructurales de los materiales (fracturación).

Tomografía Eléctrica (ERT)

La técnica tomográfica (tomos = sección) permite aplicar el método geoeléctrico a lo largo de un perfil y analizar, de forma conjunta, las diferentes resistividades en dos o tres dimensiones (2D/3D). La aplicación de la misma es similar a la mencionada para los SEV con la mejora en los modelos de interpretación por inversión de los datos y la posibilidad de definir estructuras como fallas, cambios laterales de facies y materiales o en la detección de huecos, galerías y conducciones (Tejada et al., 2021).

Potencial Espontáneo (SP)

Se trata de una técnica de campo natural y, por lo tanto, tiene una interpretación cualitativa. No obstante, esta técnica permite estudiar variaciones en los materiales (composicionales, químicas y, sobre todo cinéticas) que generen un potencial (voltaje) en el subsuelo. La aplicación de la misma es sencilla, midiendo con un dipolo, y se puede aplicar conjuntamente a las técnicas antes comentadas. Tiene su máxima utilidad en la investigación de flujos de agua subterránea.

Polarización Inducida (IP)

No es una técnica muy empleada en la investigación geológica, si no, más bien en exploración minera, pero es una buena herramienta para la distinción o separación de depósitos de arcillas frente a materiales saturados (acuíferos) en intervalos de bajas resistividades.

Registros en pozo

Los registros de pozos geoelectrónicos se realizan en perforaciones desnudas (estables) para definir parámetros relacionados con las características de los acuíferos o de algunos materiales en el entorno cercano de la perforación. Se suelen aplicar medidas de resistividad dobles (tipo calicata eléctrica) y potencial espontáneo (SP).

Método Electromagnético (EM)

El método electromagnético (EM) se basa en el estudio de la respuesta del terreno (campo inducido sobre un material conductor) ante un campo EM generado en superficie. Dependiendo de la frecuencia de trabajo en el sistema emisor se podrá disponer de diferentes profundidades y precisiones de investigación. Está limitado a materiales con capacidad de conducción de la corriente eléctrica que sean capaces de ser inducidos por el campo primario aplicado.

Dominio de la frecuencia (FDEM)

La técnica de análisis en el dominio de la frecuencia se basa en la aplicación de campos EM de diferente intensidad y frecuencia para realizar una investigación de carácter superficial a mediana profundidad. Se suele aplicar en la detección de materiales con carácter metálico o en la investigación de plumas de contaminación.

Dominio del tiempo (TDEM)

La otra técnica que se basa en la generación de campos EM amplios es la del estudio del decaimiento de la inducción generada en los materiales. Frente a la anterior, ésta es una técnica que permite alcanzar mayor profundidad (hasta 400 y 500 m) con una ocupación del terreno mínima (bucles o loops de unos 40 m de lado). Es una técnica similar (en resultados y proceso de interpretación) y equivalente a la ejecución de un SEV (Martínez-Moreno et al., 2016).

Georadar (GPR)

A diferencia de las dos técnicas anteriores del método EM, el georadar o GPR (Ground Penetrating Radar) es de tipo reflectivo, con emisión de un pulso electromagnético que es detectado en superficie por un receptor tras haberse producido una reflexión en un elemento del terreno (anomalía). Se trata de una herramienta de investigación de gran precisión, pero de escasa penetración en el terreno (10 a 20 m como máximo, con resolución decreciente a medida que se profundiza) debido a las frecuencias de emisión del pulso que emplea. En medios saturados no es aplicable ya que los niveles freáticos actúan a modo de espejo para dichos pulsos.

Se puede aplicar con éxito en la localización de servicios enterrados (cables y tuberías) independientemente de su composición y como investigación geológica puede detectar cambios en la resistividad (impedancia eléctrica) en el terreno siempre y cuando no sean apantallados por otros menos profundos. Es una excelente opción para la detección de huecos en el terreno dentro de los parámetros de profundidad indicados (Davis y Annan, 1989).

La investigación geofísica en el anexo II del AM-43 para el estudio de las balsas de relaves mineros

El AM-43 está referido exclusivamente a la investigación de las presas de relaves mineros durante su etapa de diseño haciendo mención al monitoreo de la misma durante su etapa de explotación. Sin embargo, no hace referencia a la etapa de cierre, la cual relega a lo dispuesto en la Ley de Minas vigente. En todo el AM-43 se hace referencia al estudio de la zona de la presa o dique mediante investigaciones geológico, geotécnicas y geofísicas. Se considera que el vaso se protegerá mediante el uso de geotextiles o geomembranas impermeables que aislen el material depositado del natural. Sin embargo, en dichas zonas se debe analizar también la estabilidad de las laderas y la posibilidad de la existencia de fallas o estructuras activas o potencialmente activas

que produzcan modificaciones en el estado de los depósitos, sobre todo en la posibilidad de filtraciones de lixiviados potencialmente tóxicos o peligrosos.

El Anexo II del AM-43 recoge la aplicación de métodos de investigación geofísica como complemento de la investigación geotécnica en varios apartados. En las citas referentes a dicha aplicación no se hace una revisión clara de su necesidad o utilidad en los estudios propuestos. En el Requisito 4.3, dedicado a la Geología Local, se indica la necesidad de ejecución de estudios de prospección geofísica (sin especificación de tipologías) enfocados a la complementación de la información sobre el terreno de cimentación de la presa (muro o dique) de relaves. En concreto se propone que estas investigaciones deben estar enfocadas al diseño de la campaña de perforación con recuperación de testigo (núcleos). Además, y en el mismo apartado, en el Requisito 4.3.2 de la Geología del Subsuelo se refiere a los estudios geofísicos como “los encargados de determinar las “capas de agua” y las características de los estratos de cimentación (sic), así como en la selección y cuantificación del material adicional de las inmediaciones para la construcción de la presa inicial” (sic).

Posteriormente, en el Requisito 4.4.2 de Caracterización Geotécnica se indica la necesidad de realizar investigaciones geofísicas relacionadas con los trabajos de campo. En dicho sentido se indica “la aplicación de ensayos de tipo refracción sísmica y de medición de ondas de corte, MASW y MAM o resistividad eléctrica” (sic). Estos estudios se aplicarán en la zona de la presa tanto de forma transversal como longitudinal a su eje y se refiere a la definición del Perfil del Terreno (según la NEC-SD-DS, 2015) en base a la velocidad de las ondas de corte en los primeros 30 metros (V_{s30}).

En el Requisito 4.7 de Peligro Sísmico y Amenaza Volcánica, en su apartado 4.7.1 Peligro Sísmico se indica que se deberá definir el espectro de peligro uniforme para el análisis de la respuesta de sitio. En este caso no se hace referencia a la investigación geofísica, pero si está implícito la aplicación de prospecciones para la construcción de dicha curva espectral.

En el siguiente apartado de este artículo se discutirá la necesidad de ejecución de ensayos geofísicos antes de la realización de las perforaciones. Por lo que respecta a detección de capas de agua (niveles acuíferos) está ampliamente probada y reconocida la aplicación de técnicas geofísicas del método eléctrico para dicha valoración (CEDEX, s.f.). Sin embargo, no queda clara la definición de las características (cuáles y con qué fin u objetivo) de los estratos de cimentación, ya que éstas se obtienen con mayor precisión de los ensayos directos (sondeos) o de laboratorio. En cuanto a la aplicación de ensayos geofísicos para la cuantificación y selección de material adicional para la construcción de la presa, el método sísmico es una herramienta fundamental en dichas labores y, en ocasiones, más práctica y económicamente rentable que las perforaciones como en el análisis de la ripabilidad y la definición de coberteras de suelos no aptas para dicho fin (Telford et al., 1990).

La caracterización geotécnica de la zona del dique o presa, complementada con ensayos geofísicos como los sísmicos activos (refracción) y los pasivos (MASW y MAM), así como los geoelectrónicos (SEV y ERT) complementan el análisis de una zona. Sin embargo, al nombrar las técnicas en el AM-43 se comete el error de obligar (en cierto sentido) en la aplicación y uso de técnicas concretas que pueden, o no, ser necesarias según la configuración geológica y de materiales de una zona. Por ejemplo, técnicas de sísmica pasiva como la ReMi suelen ser más precisas y aplicables que las MAM indicadas y ofrecen el mismo o mejor resultado (Reynolds, 1997), aportando también el valor de la V_{s30} , por ejemplo.

En el apartado de Peligro Sísmico no se indica la aplicación de ninguna investigación geofísica, si bien se ha considerado en el Requisito 4.4.2 el cálculo de la V_{s30} para la definición del Perfil del Terreno siguiendo la normativa de construcción NEC-SD-DS (2015) vigente y el cual es fundamental para la definición del espectro de peligro uniforme. Lo mismo ocurre, en caso de que la presa sea construida sobre sedimentos y no sobre roca, con la necesidad de definición del periodo fundamental de vibración del terreno (T_0) el cual no está contemplado de forma explícita.

En otros apartados del Anexo II se requieren análisis de la licuación dinámica (Requisito 10.1.3) a través del uso de ensayos como el SPT y no mediante la aplicación de sísmica pasiva, más oportunos, ya que el

ensayo SPT está ampliamente desaconsejado en este tipo de análisis y no así la investigación geofísica (Moreno Robles, 2022).

Por último, en el Requisito 13.3 de Monitoreo Geotécnico se indica la necesidad de instalación de equipo geofísico como acelerógrafos con medida continua, pero solo se referencia su uso en “grandes presas”, cuando dicho término no está definido en el AM-43. También se deben considerar los análisis mediante técnicas pasivas del método sísmico (HVSr) como complementarias a dichas medidas.

DISCUSIÓN Y COMENTARIOS AL USO DE INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA EN LOS ESTUDIOS DE PRESAS DE RELAVES

La investigación geofísica es una herramienta más a aplicarse en la prospección geológica y geotécnica de una zona, pero, aunque es considerada como complementaria, presenta una importancia elevada. Si bien en el AM-43 se indica que estas técnicas se deben aplicar previamente para la definición de las zonas a explorar posteriormente de forma directa, mediante perforaciones (Requisito 4.3.2), tanto en las publicaciones de ANCOLD (2020) como en las del USACE (1995) se indica que su uso como complemento a las labores geotécnicas (por ejemplo para la ampliación de datos en el área de exploración) es indispensable; lo que significa que se deben aplicar no solo antes de la ejecución de dichos ensayos sino a la vez o de forma posterior para suplementar y definir datos puntuales o localizados obtenidos en las perforaciones (ANCOLD, 2012).

De forma general, tanto los ensayos directos de campo (perforaciones y calicatas o apiques) como los de laboratorio ofrecen resultados puntuales y localizados. Y, en muchos casos, de muestras o análisis del terreno alterados o semialterados; mientras que los ensayos geofísicos, contemplan el análisis del terreno de forma no alterada e in-situ aplicados e involucrando a un área más amplia del terreno. También tienen como ventaja el que se trata de métodos no invasivos, con una ocupación temporal y respetuosos con el medio ambiente USACE (1995). En las publicaciones citadas también se indican las ventajas del uso de dichos métodos como elementos de aplicación y evaluación rápida de ciertas condiciones geológicas que, como métodos indirectos que son, precisan de comprobación posterior con métodos directos (sondeos).

Se analizará a continuación las diferentes técnicas que se pueden aplicar en las tres diferentes fases de la vida de una presa de relaves y se relacionará con las que se indican en el Anexo II del AM-43. Se debe considerar que la amplitud o superficie de la zona de estudio para la cimentación del dique dependerá de tipo de diseño de construcción de la presa elegido, ya que la zona ocupada es diferente según el diseño (Figura 3).



FIGURA 3

Tipos de presas de relaves de construcción secuencial

La tipología “aguas arriba” no está permitida su aplicación en Ecuador a partir del AM-43 (2020).
Modificado de Vick (1983)

Las relaveras de recrecimiento secuencial de tipo “aguas abajo”, aunque en su fase inicial ocuparían una zona limitada o reducida (F_0), el dique se va a ampliar en las diferentes fases (F_1 , F_2 ...) hacia la zona externa al embalse (hacia afuera del eje inicial) y, por lo tanto, también se deberá conocer el estado del terreno hacia donde se recrecerá el dique antes de iniciar las labores de construcción. Esta zona será mucho más amplia, como se observa en la Figura 3, que la necesaria para la construcción de una presa de relaves con el dique centrado en el eje. En este caso, la zona de cimentación y apoyo, si bien también se va a ampliar en las fases sucesivas, el espacio necesario es mucho menor y, por lo tanto, las necesidades de investigación son menores. Como referencia indicar que en AM-43 se indica claramente la prohibición de emplear diseños de presas con recrecimientos “aguas arriba”, por los fallos y problemas que han planteado a lo largo de su historia.

Etapa de Investigación y Exploración

Esta primera etapa es la inicial y previa a la construcción. Está constituida por las investigaciones para el conocimiento del terreno y se extendería hasta la terminación de la construcción del dique y el inicio de las labores de llenado del embalse (fase f_0 , en la Figura 3). Es a la que se refiere con mayor amplitud el AM-43, siendo la más importante, ya que se van a definir las características del terreno de apoyo tanto de la cimentación de la estructura de cierre (dique) como de la zona de relleno del vaso.

Es recomendable la aplicación de varios métodos y/o técnicas en la investigación de la zona de apoyo, las cuales serán correlacionadas con perforaciones. La aplicación de los sondeos puede ser de forma alterna, entre las investigaciones geofísicas, o co-espacial (sobre las investigaciones geofísicas), sobre todo si se pretende hacer una correlación y emplear una parametrización de los niveles geofísicos en relación con los datos de las perforaciones.

Las investigaciones mediante el método sísmico, sobre todo las de las técnicas activas como la refracción y las pasivas, permiten determinar la compacidad del terreno, la existencia de materiales alterados, la profundidad del substrato rocoso y el cálculo de los parámetros elásticos dinámicos (en la combinación

de técnicas activas y pasivas, solamente), siendo estos parámetros útiles y aplicables en la caracterización geotécnica. La técnica de refracción de tipo bidimensional, por lo que, además de la definición de los mencionados parámetros, se podrá determinar la geometría de los niveles geofísicos. Su aplicación debe considerar las inclinaciones y pendientes del terreno ya que cambios de topografía muy bruscos pueden generar errores en la medida e interpretación de los datos adquiridos. Las técnicas pasivas, como la HVSR, permitirá analizar la amplificación del terreno (efecto sitio) para considerar la aceleración final del terreno y no emplear la genérica en roca (PGA).

Las técnicas del método geoelectrico son una excelente opción de combinación con las del método sísmico, sin embargo, estas técnicas no proporcionan parámetros geotécnicos (geomecánicos), solo geológicos. Estas técnicas permiten el estudio y definición de la estratigrafía del terreno, la definición del grado de humedad de los niveles (estableciendo previamente relaciones con ensayos de campo), definición de niveles freáticos o acuíferos profundos y en el caso de técnicas 2D o 3D, como la tomografía, la definición de huecos o cavidades en el terreno y el estudio y trazado de estructuras internas en los materiales (fallas, discordancias y discontinuidades).

Los métodos EM tienen una aplicación más restringida, sobre todo en aplicaciones geotécnicas ya que son similares en sus resultados a los geoelectricos. Sin embargo, las técnicas FDEM y la TDEM son fáciles de aplicar y con resultados en términos de geología de buena precisión. En los mismos términos que se ha comentado en los párrafos anteriores estas técnicas geofísicas son aplicables en la investigación del vaso del embalse. Si bien en esta zona, donde se verterán los residuos y relaves mineros, la geotecnia no tiene tanta trascendencia como en la de construcción del dique, es necesario definir la posible presencia de materiales muy blandos que, a lo largo de la vida de la relavera puedan generar subsidencias, asentamientos o hundimientos. Estos procesos pueden afectar a la integridad de la geomembrana de aislamiento aplicada para contener los lixiviados que se puedan producir. Con respecto al estudio de filtraciones de lixiviados se puede instalar entre la geomembrana y el terreno natural un conjunto de electrodos y cables que ofrezcan información a lo largo del tiempo de la posible existencia de poros en la geomembrana (método geoelectrico).

También tiene que ser de obligada investigación la estabilidad de los taludes que se producirán en la zona del embalse ya que movimientos en masa o deslizamientos pueden afectar a la estructura del dique (por empuje) y al conjunto de la relavera.

En la Tabla 2 se han referenciado, resumido y analizado las técnicas más oportunas y aplicables en la investigación previa. Se ha indicado también las principales aplicaciones y utilidad tanto en la investigación geológica como en la geotécnica. También se ha complementado esta clasificación con comentarios sobre su aplicación, limitaciones o forma de emplear cada técnica.

TABLA 2
Aplicación y uso de técnicas geofísicas para el estudio
previo de presas de relaves. Fase Investigación y Exploración

Técnica	Geología	Geotecnia	Comentarios
Refracción	Distribución 2D de materiales, compacidad, ripabilidad, basamento	Densidad (1), parámetros elásticos dinámicos (2)	(1) Valores aproximados (2) Junto con la medida de la Vs en pasiva
Reflexión	Estructura geológica y tectónica profunda	Definición de materiales (3)	(3) Es obligatorio hacer también refracción profunda
MASW	Distribución de materiales en función de la Vs	Definición de materiales y parámetros elásticos dinámicos (4)	(4) Junto con la medida de la Vp en refracción
ReMi	Distribución profunda de materiales en función de la Vs	Definición de materiales y parámetros elásticos dinámicos (4)	Similar a la MASW, pero alcance más profundo
MAM	Distribución profunda de materiales en función de la Vs	Definición de materiales	Similar a la ReMi pero de alcance más profundo y menor resolución en superficie
HVSR	Determinación del sustrato rocoso	Condiciones sísmicas y amplificación de sitio (6)	(6) No del todo aceptada por varios autores, se usará con reservas
SPAC	Distribución profunda de materiales en función de la Vs	Definición de materiales	Similar a la ReMi pero de alcance más profundo y menor resolución en superficie
UP - Down - Cross Hole	Estudio complementario de características geológicas	Parámetros geomecánicos y elásticos dinámicos midiendo Vp y Vs	Se necesita una preparación previa y compleja del sondeo
SEV	Estratigrafía y niveles acuíferos, basamento	No aplicable	Estudio puntual en la vertical de la aplicación
Tomografía	Estratigrafía y niveles acuíferos, estructura, fallas, huecos, basamento	No aplicable	Limitaciones laterales que se solventan con técnicas roll-on
SP	Flujos de agua	No aplicable	Uso limitado, cualitativo
FDEM	Zonas con humedad y/o saturación	No aplicable	Uso limitado a zonas superficiales, cualitativo
TDEM	Estratigrafía, acuíferos, basamento	No aplicable	Estudio puntual en la vertical de la aplicación

Etapa de Mantenimiento y Explotación

La etapa de explotación y almacenamiento está dominada por la fase de relleno y colmatación de la zona del vaso del embalse. En esta etapa las labores de monitorización de la presa o dique, principalmente, pero también de la compactación de materiales en la relavera (estado seco) y del seguimiento de la estabilidad de los taludes en la zona del vaso y el estudio de las posibles filtraciones de lixiviados a zonas exteriores al complejo de relaves serán las que se deban gestionar. Los problemas de aplicación de ensayos geofísicos en esta etapa es el estado, normalmente, en fase acuosa de los relaves, pero existen técnicas tanto en el método sísmico como eléctrico que pueden ser aplicadas sobre zonas inundadas empleando equipos especializados.

En este periodo, el monitoreo y seguimiento de las condiciones de humedad (mediante piezómetros de cuerda vibrante y abiertos de Casagrande) del interior de la presa se pueden complementar con estudios de tipo geoelectrico, por ejemplo, aplicando la técnica tomográfica. Es posible establecer estudios 3D y 4D (a lo largo del tiempo) y analizar las variaciones que se producen tanto en el núcleo del dique como en los espaldones (Anterrieu et al., 2010). Existen técnicas de desarrollo (con marca registrada o privadas) en las que se emplea el potencial espontáneo (SP) y los análisis de tipo potencial mediante dispositivos dipolo-dipolo para la detección de perforaciones, fallos del sello o desgarros en la colocación de las geomembranas (Meléndez et al., 2017).

También las mismas técnicas geoelectricas y las del método EM (FDEM y TDEM) pueden ser un apoyo importante en los posibles análisis de filtraciones y cambios en la estructura interna y humedad entre las diferentes fases de recrecimiento de la presa en los materiales del núcleo, así como de la presencia de lixiviados (análisis de la variación de la resistividad, normalmente con decrecimientos importantes observables a lo largo del tiempo) en el entorno cercano o bajo la misma relavera (Anterrieu et al., 2010).

Las medidas mediante el método sísmico activo (refracción y MASW) y pasivo (ReMi y MAM) pueden correlacionarse con procesos de posible asentamiento o compactación no controlados, como complemento de las medidas mediante células de asentamiento. Y la monitorización mediante técnicas pasivas HVSR a lo largo del tiempo pueden ser valoradas en relación con cambios en condiciones dinámicas, como tras una situación post-sismo.

En la Tabla 3 se hace una nueva revisión de las técnicas geofísicas de los diferentes métodos con sus posibles aplicaciones e implicaciones en estudios geológicos y geotécnicos.

TABLA 3
Aplicación y uso de técnicas geofísicas para el mantenimiento de presas de relaves. Fase Mantenimiento y Explotación

Técnica	Geología	Geotecnia	Comentarios
Refracción	Compacidad, ripabilidad, basamento	Densidad, parámetros elásticos dinámicos	Estudio de taludes y variaciones en el estado de rellenos y dique o presa
SASW	Distribución de la Vs en zonas superficiales	Parámetros geomecánicos estimados	Análisis de estructuras de hormigón armado o zonas de la presa
MASW	Distribución de materiales en función de la Vs	Definición de materiales y parámetros elásticos	Estudio de taludes y variaciones en el estado de rellenos y dique o presa
ReMi	Distribución profunda de materiales en función de la Vs	Definición de materiales y parámetros elásticos	Estudio de taludes y variaciones en el estado de rellenos y dique o presa
HVSR	Complementación de datos en otras técnicas	Variaciones en condiciones sísmicas y amplificación de sitio	Estudios a lo largo del tiempo (4D)
Cross Hole	Estudio de estado de materiales y características geológicas	Parámetros geomecánicos y elásticos dinámicos midiendo Vp y Vs	Análisis de estructuras rígidas, presa, tubificación, huecos y variaciones en los materiales
SEV	Variación de la humedad/saturación en la presa	No aplicable	Estudio puntual de filtraciones o cambios de saturación/humedad, estudio de deslizamientos y taludes
Tomografía	Variación de la humedad/saturación en la presa	No aplicable	Estudio de filtraciones o cambios de humedad (4D), taludes y deslizamientos, huecos y tubificación
FDEM	Variación de la humedad/saturación	No aplicable	Estudio de taludes y relaves
TDEM	Variación de la humedad/saturación profunda	No aplicable	Estudio puntual de filtraciones y lixiviados profunda o cambios de humedad, estudio de deslizamientos y taludes
Georadar	Localización de servicios enterrados, huecos y variaciones en superficie	No aplicable	Limitado a estructuras construidas

Etapa de Cierre y Abandono

Es la etapa menos clarificada en el AM-43 y en la Ley de Minas (o el Acuerdo Ministerial 37, 2016) vigente, donde solamente se indica la necesidad de que las presas de relaves sean estables a lo largo del tiempo. Sin embargo, la monitorización de estos pasivos mineros es tan importante en esta fase como en las anteriores con el fin de analizar cualquier situación de inestabilidad que se pueda producir. El abandono de las labores mineras (y la posibilidad de desaparición de la empresa concesionaria como responsable de la misma) implica que la relavera no va a ser controlada a lo largo del tiempo.

Las condiciones meteorológicas, erosión superficial o profunda, filtraciones y otros eventos geológicos o geomorfológicos pueden deteriorar los elementos constitutivos del sistema de contención y materiales acopiados a velocidades no apreciables a simple vista o en tiempos cortos (FEMA, 2004).

La recomendación sería realizar estudios periódicos, como la aplicación de ensayos geofísicos, los cuales no son excesivamente costosos, y permiten estudiar la evolución del conjunto a lo largo del tiempo. Ensayos de sismica de refracción, por ejemplo, para el estudio de la compactación/alteración de los materiales, tanto de la presa como del vaso, y aplicados a la estabilidad de las laderas circundantes, los cuales se pueden complementar con investigación de técnicas pasivas (MASW o ReMi) que pueden determinar la presencia de cambios en las condiciones originales de los materiales (Gómez-Ortiz et al., 2010).

Por otro lado, como ya se ha comentado, es recomendable combinar estas técnicas sísmicas, tanto para la presa como para el vaso de la relavera, con investigaciones geoeléctricas (tomografía y/o SEV) ya que la aplicación conjunta de ambos métodos permitirá definir un modelo de variación más preciso (Gómez-Ortiz y Martín-Crespo, 2010).

También, en esta fase, la aplicación de la técnica del georadar puede definir variaciones superficiales en las caras externas de la presa que generen, a futuro, erosión superficial o “desconchamiento” de la misma. En la Tabla 4 se relacionan las técnicas más útiles en la investigación geofísica en esta fase.

TABLA 4
Aplicación y uso de técnicas geofísicas para el cierre de presas de relaves. Fase Cierre y Abandono

Técnica	Geología	Geotecnia	Comentarios
Refracción	Compacidad, materiales en taludes	Densidad, compactación	Estudio de taludes y variaciones en el estado de rellenos y dique o presa
MASW	Variaciones en materiales en función de la Vs	Definición de materiales y parámetros elásticos dinámicos	Estudio de taludes y variaciones en el estado de rellenos y dique o presa
ReMi	Estado profundo de materiales en función de la Vs	Definición de materiales y parámetros elásticos dinámicos	Estudio de taludes y variaciones en el estado de rellenos y dique o presa
HYSR	No aplicable	Variaciones en condiciones sísmicas y amplificación de sitio	Estudios a lo largo del tiempo (4D) y post-sismo
SEV	Variación de la humedad/saturación en la presa y los relaves	No aplicable	Estudio puntual de filtraciones o cambios de saturación/humedad y estudio de laderas
Tomografía	Variación de la humedad/saturación en la presa y los relaves	No aplicable	Estudio de filtraciones o cambios de humedad (4D), estado de laderas, huecos y tubificación
TDEM	Variación de la humedad/saturación profunda en presa y relavera	No aplicable	Estudio puntual de filtraciones y lixiviados profunda o cambios de humedad, estudio de laderas

Como se ha observado, existe la posibilidad de aplicar y desarrollar investigaciones geofísicas mucho más amplias en la investigación geológico-geotécnica de las diferentes fases de la vida de una relavera que las expresadas en el AM-43 y que deberían ser analizadas e incorporadas no con obligatoriedad, pero sí como referencia en dicho Acuerdo y en la Normativa de las mismas.

CONCLUSIONES

La investigación geofísica se presenta como una herramienta de obtención de información complementaria y fundamental en las diferentes etapas de los estudios de diseño, construcción, explotación y cierre de un

embalse de relaves mineros, tanto para la zona de la presa como para el vaso donde se depositarán los materiales.

La combinación en la aplicación de diferentes métodos y técnicas geofísicas sobre la misma zona permite obtener una mejor definición y precisión de los parámetros del terreno, tanto geológicos como geotécnicos y en la mejora de los modelos geofísicos obtenidos.

La investigación geofísica permite ampliar los resultados de investigaciones geotécnicas de tipo puntual como sondeos o ensayos CPT y ensayos de laboratorio. En ese sentido, se puede y se debe aplicar en cualquier fase de investigación geológica o geotécnica (previa, avanzada o definitiva) y no solamente en fases iniciales como definición de otros ensayos (como los sondeos). Además, como técnica indirecta, la interpretación debe ser corroborada y respaldada por ensayos directos, los cuales se debería realizar antes o durante la campaña geofísica.

El Acuerdo Ministerial 43 (2020) en su Anexo II, se centra, en sus recomendaciones de aplicación de labores de investigación geofísica, solamente en la aplicación en etapa inicial y previa a la definición de la zona de construcción de la presa. Además, los relaciona con los estudios de Geología del Subsuelo y en la Caracterización Geotécnica de la zona de la presa. Sin embargo, en su Art.4 de Conceptos Técnicos indica la necesidad de seguir estándares, guías y publicaciones técnicas de instituciones internacionales como la Asociación Canadiense de Presas (CDA), el Comité Nacional Australiano de Grandes Presas (ANCOLD) o la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), donde se reconocen las técnicas geofísicas como herramientas complementarias y necesarias para la investigación completa del emplazamiento en todas las fases y etapas del desarrollo del proyecto de un embalse destinado a la acumulación de relaves mineros.

Es conveniente y recomendable la revisión de dicho Acuerdo y la Normativa vigente para que se incorporen y se den a conocer las aplicaciones y utilidad de la investigación geofísica en las diversas técnicas analizadas y se incorporen fases de desarrollo y cierre de relaveras en la investigación y estudio que esté a cargo de la misma empresa minera.

REFERENCIAS

- Alonso-Pandavenes, O., Torres, G., Torrijo, F.J., y Garzón-Roca, J. (2022) Basement tectonic structure and sediment thickness of a valley defined using HVSR geophysical investigation, Azuela valley, Ecuador. *Bull Eng Geol Environ*, 81, 210. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02679-y>.
- ANCOLD - Australian National Committee on Large Dams (2012) *Guidelines on tailings dams planning, design, construction, operation and closure*.
- ANCOLD - Australian National Committee on Large Dams (2020) *Guidelines for geotechnical investigations of dams, their foundations and appurtenant structures*.
- Anterrieu, O., Chouteau, M., y Auberin, M. (2010) Geophysical characterization of the large-scale internal structure of a waste rock pile from a hard rock mine. *Bull Eng Geol Environ*, 69, 533–548 <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0264-4>.
- Beltrán-Rodríguez, L.N., Larrahondo, J.M., y Cobos, D. (2018) Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 44, 5-20.
- CEDEX – Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (s.f) *Técnicas Geofísicas*. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- Davis, J.L., y Annan, A.P. (1989) Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551.
- FEMA - Federal Emergency Management Agency (2004) *Federal guidelines for dam safety*. U.S. Department of Homeland Security, Interagency Committee on Dam Safety.

- Gómez-Ortiz, D., y Martín-Crespo, T. (2010) *Geofísica en una Balsa de Lodos de San Quintín Este*. Documento GEMM - Proyecto de Innovación 123 – UCM. https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/San_Quintín_Innova/Geofísica_SQ.pdf (consultado el 12-8-2022).
- Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martín-Crespo, T., De Ignacio-San José, C., y Lillo-Ramos, F.J. (2010) Application of Electrical Resistivity Tomography (ERT) to the environmental characterization of abandoned massive sulphide mine ponds (Iberia Pyrite belt, SW Spain). *Near Surface Geophysics*, 8, 65-74.
- Louie, J.N. (2001) Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347–364 <https://doi.org/10.1785/0120000098>.
- Martínez-Moreno, F.J., Monteiro-Santos, F., Madeira, J., Bernardo, I., Soares, A., Esteves, M., y Adão, F. (2016) Water prospection in volcanic islands by Time Domain Electromagnetic (TDEM) surveying: The case study of the islands of Fogo and Santo Antão in Cape Verde. *Journal of Applied Geophysics*, 134, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.09.020>.
- Melendez, J., Baldyga, C., y Prota, S. (2017) Innovative leak location technologies for large tailings dams. *Geosynthetics Conference*. Chile.
- Moreno Robles, J. (2022) El fenómeno de la Licuación por flujo. Aproximación teórica y práctica. *Geotecnia*, 156 (noviembre), 3-32. https://doi.org/10.14195/2184-8394_156_1.
- Nakamura, Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research*, 30, 25-33.
- NEC-SD-DS (2015) MIDUVI - Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. República de Ecuador.
- Orellana, E. (1982) *Prospección Geoeléctrica*. Madrid: Paraninfo.
- Park, C.B., Miller, R.D., y Xia, J. (1999) Multi-channel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 64 (3). <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Reynolds, J.M. (1997) *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: Wiley.
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, R., Díez-Herrero, A., y Pereira, H. (2008) Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 846-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>.
- Rhon Dávila, J. (2020) Informe Geotécnico Embalse De Residuos Mineros Sólidos Armijos -Código 191037 Estabilidad Física Del Embalse. Austro Gold Cia. Ltda.
- Sernageomin 2022– Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (s.f.) *Preguntas frecuentes sobre relaves*. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf> (consultado el 12-8-2022).
- Stachan, C., y Goodwin, S. (2015) The role of water management in tailings dam incidents. *Proceedings Tailings and Mine Waste 2015*. Vancouver, BC, October, 26-28.
- Tejada, K., Quispe, S. y Parra, D. (2021) Aplicaciones del ensayo de tomografía eléctrica a problemas de la ingeniería geotécnica en la minería. *Rumbo Minero Internacional*. <https://www.rumbominero.com/revista/articulos-tecnicos/aplicaciones-del-ensayo-de-tomografia-electrica-problemas-de-la-ingenieria-geotecnica-en-la-mineria/> (consultado el 12-8-2022)
- Telford, W.M., Geldart, L.P., y Sheriff, R.E. (1990) *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- USACE - U.S. Army Corps of Engineers (1995) Engineering and Design. *Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations*, EM 1110-1-1802.
- Vick, S.G. (1983) *Planning, design, and analysis of tailings dams*. N.Y.-USA: Wiley-Interscience publication.

ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS EMPLEADOS

1D/2D/3D/4D : Representaciones o estudios uni, bi, tri o cuatridimensionales

ERT : Electrical Resistivity Tomography

- f_0 : Frecuencia fundamental de vibración del terreno
- FDEM : Frequency domain ElectroMagnetics
- GPR : Ground Penetrating Radar
- HVSR: Horizontal to Vertical Spectral Ratio
- IP : Induced Polarization
- MAM: Microtremor Array Measurement
- MASW : Multichannel Analysis of Spectral Waves
- NEC-SD-DS : Norma Sismo Resistente del Ecuador. Capítulo de Diseño Sísmico
- PGA : Peak Ground Acceleration
- ReMi : Refraction Microtremor
- Ripabilidad : Capacidad de un material a ser arrancado mecánicamente
- sCPTu : Seismic Cone Penetration Test
- sDMT : Seismic Dilatometer Marchetti Test
- SASW : Spectral Analysis of Surface Waves
- SP : Spontaneous Potential
- SPT : Standard Penetration Test
- T_0 : Periodo de vibración natural del terreno
- TDEM : Time domain ElectroMagnetics
- TWT : Two-way travel time. Tiempo de viaje del frente de onda de ida y vuelta
- V_p : Velocidad de la onda de compresión (P)
- V_s : Velocidad de la onda de corte (S)
- V_{s30} : Velocidad media de la onda de corte S en los primeros 30 m del terreno