

Referencia:

INFORME

MEMORIA JUSTIFICATIVA DE LA EJECUCIÓN DEL C.M. ASESORAMIENTO EN MATERIA GEOTÉCNICA Y DE ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE LAS ACTUACIONES EN LA IRMA “EL DESCARGADOR II” (CÓDIGO IGME: 977 II 4 024), T.M. LA UNIÓN (MURCIA).

Nº DE EXPEDIENTE: 22PFCM101.

SISTEMA DE ADJUDICACIÓN: Contrato Menor

Índice

	Páginas
1. Resumen	3
2. Antecedentes	4
3. Trabajos realizados por el CN IGME CSIC	4
4. Resultados de la visita realizada por CN IGME CSIC a la presa El Descargador II	4
5. Consideraciones y análisis del informe presentado por la empresa ERM	8
6. Calculo de estabilidad geotécnica	19
7. Ensayos y procedimientos necesarios para el análisis de estabilidad geotécnicas de las presas de residuos mineros (tenso-deformacional y equilibrio limite)	23
8. Conclusiones	24
9. Referencias	24

1. Resumen

De la revisión y análisis de la documentación enviada al CN IGME CSIC por La Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico se ha concluido que: el análisis de estabilidad propuesto en el informe parte de la hipótesis de un modelo sencillo de 3 capas. Niveles geotécnicos 1, 2 y 3, con contactos paralelos, subhorizontales o de bajo ángulo de inclinación. Esto se considera una simplificación excesiva, teniendo en cuenta que tanto los sondeos mecánicos y DPSHs, como los resultados de la geofísica sugieren que la estratigrafía es más compleja.

El problema es que, a pesar de haber realizado una campaña geofísica más exhaustiva, en la documentación sólo se incluye uno de los perfiles. Eso hace que sea complicado determinar la distribución espacial de las distintas unidades en el subsuelo. De todos modos, el modelo considerado no parece reflejar de manera suficientemente representativa la distribución de las unidades en la zona del depósito de El Descargador II, que presenta mayor complejidad que la mostrada en el modelo. Sería interesante disponer de todas las imágenes geofísicas (SRT, MASW, ERT e IP) para los diferentes perfiles. En base a estos datos, se deberían seleccionar las secciones más representativas y que permitieran analizar las secciones más desfavorables y comprobar si las secciones propuestas para el análisis son las idóneas.

El análisis de estabilidad se realiza considerando unos parámetros de corte asignados de una manera que se considera arbitraria. Si bien la unidad 1 sí está caracterizada mediante ensayos de laboratorio e "in situ" (i.e. DPSH y SPT), los parámetros asignados para las unidades 2 y 3 están únicamente basados en el criterio y experiencia de IGEOEST, sin mayor justificación. Únicamente se dispone de algunos valores de DPSH en el nivel 2 y no fueron tomadas muestras para su ensayo en laboratorio, lo cual supone una limitación importante para un correcto análisis. EL nivel 3 sólo fue atravesado por 2 de los sondeos y no se tomaron muestras para su caracterización y análisis.

Los parámetros característicos para el nivel 1 y 2 se consideran poco conservadores y requieren de una mayor justificación. Al nivel 1 se le atribuye una densidad de $1,8 \text{ g/cm}^3$ mientras que el promedio de los valores obtenidos indicaría que este está mucho más próximo a $1,9 \text{ g/cm}^3$. Además, teniendo en cuenta que dichos materiales podrían llegar a un mayor grado de saturación, dichos pesos específicos podrían llegar a ser superiores incluso de 2 g/cm^3 o excepcionalmente más.

En cuanto a los parámetros de corte, al nivel 1 se le asigna un ángulo de rozamiento interno de 34° , a pesar de que únicamente uno de los ensayos de corte ha ofrecido valores de 38° mientras que los otros han sido del orden de 23° , 24° y 31° . Teniendo en cuenta los bajos golpes obtenidos en los ensayos DPSH para este nivel, asignar un valor característico de 34° podría no quedar del lado de la seguridad. Cabe tener en cuenta que los factores de seguridad obtenidos son muy sensibles al valor de ángulo de rozamiento considerado. En cuanto a la cohesión, un análisis en condiciones a largo plazo (drenadas) para esta tipología de material, parece sugerir que la cohesión efectiva podría llegar a anularse completamente ($c'=0$), supuesto que suele ser habitual en esta tipología de análisis. Los parámetros para el nivel 2 también requieren mayor justificación.

No se muestran los datos en bruto de la geofísica (pseudosecciones, secciones de cobertura de rayos sísmicos), ni se muestran todas las imágenes geofísicas. Tampoco se presenta nada detallado sobre la circulación de las aguas subterráneas. El informe tampoco incluye la determinación de parámetros importantes como la conductividad hidráulica saturada horizontal y vertical, direcciones preferentes de circulación de flujo, etc. Parámetros críticos a incluir en un análisis de estabilidad geotécnica-estructural de una presa de lodos mineros. No se muestran los resultados de repetitividad de las lecturas "0". En resumen, el informe no cumple con los estándares de un estudio de estabilidad geotécnico-estructural de una balsa minera.

2. Antecedentes

La Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, mediante contrato menor N° de Expediente: 22PFCM101 firmado el 21 de octubre de 2022, solicitaba al CN IGME-CSIC informe sobre los estudios geotécnicos realizados en la balsa de lodos mineros “EL DESCARGADOR II” (CÓDIGO IGME: 977 II 4 024), T.M. LA UNIÓN (MURCIA). Para ello envió vía correo electrónico en formato pdf al CN IGME CSIC la siguiente documentación, el día 29 de mayo de 2023. El documento fue preparado por la empresa ERM Iberia, S.A., nombre comercial Environmental Resources Management - ERM Iberia, S.A.

Título del trabajo “Informe sobre El Descargador II, Cartagena. Referencia ERM: 0463194 rev1. Preparado para Revalorizaciones de Estériles Mineros, S.L., con fecha 2 de agosto de 2018. A continuación, se muestra la relación de los documentos recibidos en el CN IGME CSIC.

1. Informe ERM sobre el descargador II. Parte I
2. Informe ERM sobre el descargador II. Parte II
3. Informe ERM sobre el descargador II. Parte III
4. Informe ERM sobre el descargador II. Parte IV
5. Informe ERM sobre el descargador II. Parte IX
6. Informe ERM sobre el descargador II. Parte V

3. Actividades desarrolladas por el CN IGME CSIC

1. Tras recibir la información se procedió a su revisión. Al ver que estaba incompleta se solicitó vía correo electrónico a la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, que enviaran la información que faltaba.
2. Revisión de la información existente en el CN IGME CSIC sobre la presa de lodos mineros El Descargador II.
3. Visita conjunta a la presa de lodos mineros El Descargador II y su radio de influencia por el personal del CN IGME CSIC y el personal de MITECO el día 03 de abril de 2003.
4. Visita del personal del CN IGME CSIC a la presa El Descargador II el 10 de abril de 2003.

4. Resultados de la visita realizada por CN IGME CSIC a la presa El Descargador II

4.1. La presa El Descargador II y su radio de influencia

La presa (o balsa) de lodos mineros El Descargador II se encuentra en el lateral izquierdo aguas abajo de la cuenca hidrográfica de la rambla Las Matildes (Figura 1). La escorrentía de la cuenca hidrográfica de la Rambla Las Matildes descargan sus aguas en el espacio protegido el Mar Menor (Figura 1). Estas descargas son intermitentes, pues solo se producen en la época de lluvia. En la cuenca hay varias presas de lodos mineros siendo una de ellas El Descargador II.

La presa El Descargador II es una presa construida por el método de aguas arriba siguiendo la metodología de crecimiento del dique. De acuerdo a su localización, es una presa de ubicación en laderas y lateral de valle o curso fluvial (Rodríguez et al., 2011). Considerando que el dique tiene más de 15 metros de altura en la zona norte, se clasifica como una gran presa. De acuerdo a su riesgo ambiental por transferencias de metales al medio ambiente es clasificada como una presa de tipo A (Real Decreto 975/2009, 2006/21/CE; Oldecop y Rodríguez, 2006).

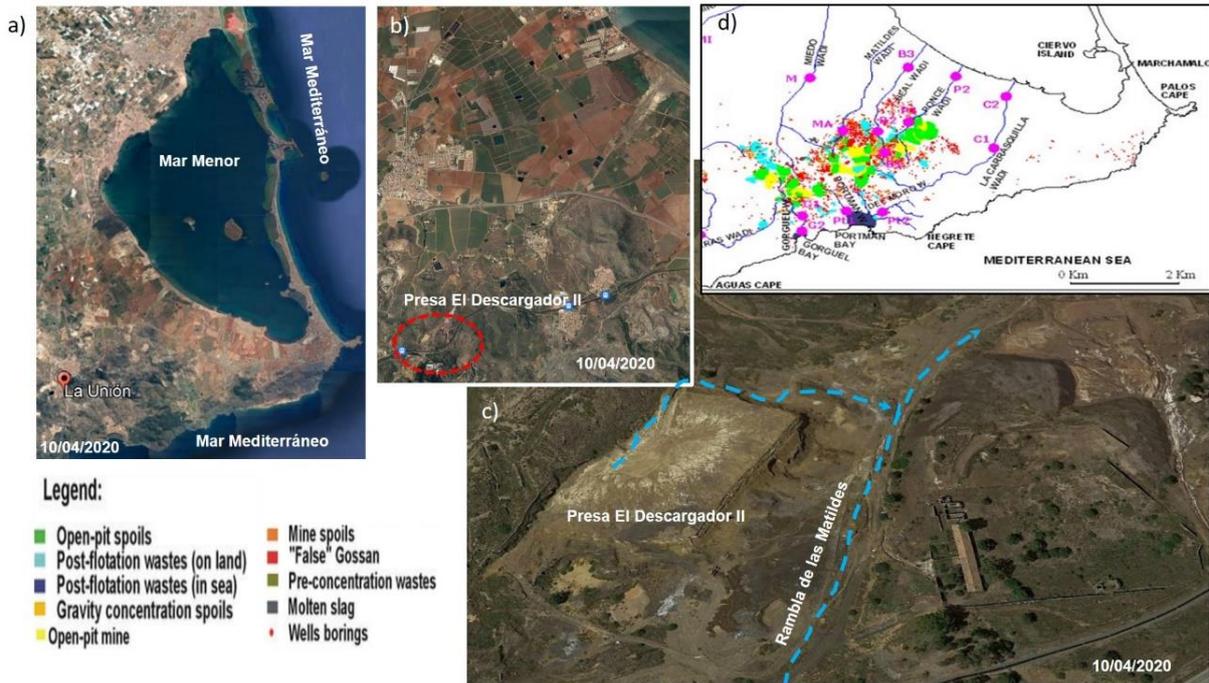


Figura 1. Localización de la presa El Descargador II y su radio de influencia: a, b y c son imágenes modificadas de Google y d) modificada de Alcolea 2015.

En el lado derecho del dique de la presa El Descargador II se encuentra un pozo minero de gran diámetro (Figura 2). En su entorno se localizan una gran cantidad de pozos mineros. Además, asociados a las rocas del entorno se pueden observar zonas hundidas. En esta presa, durante la inspección de campo, se observó una chimenea de drenaje (Figura 3) pero no se observó la existencia de un sistema de drenaje con salida al exterior, que probablemente esté sepultado o cubierto por las zonas de deslizamientos. Como drenaje superficial, existe una gran zanja que evacua el agua que cae directamente sobre toda la superficie de la presa vertiéndola hacia el norte, desde donde escurre en dirección este hasta la rambla Las Matildes (Figuras 1, 2 y 3). En algunos sectores del dique se pueden observar vestigios de drenes franceses (Figura 3).

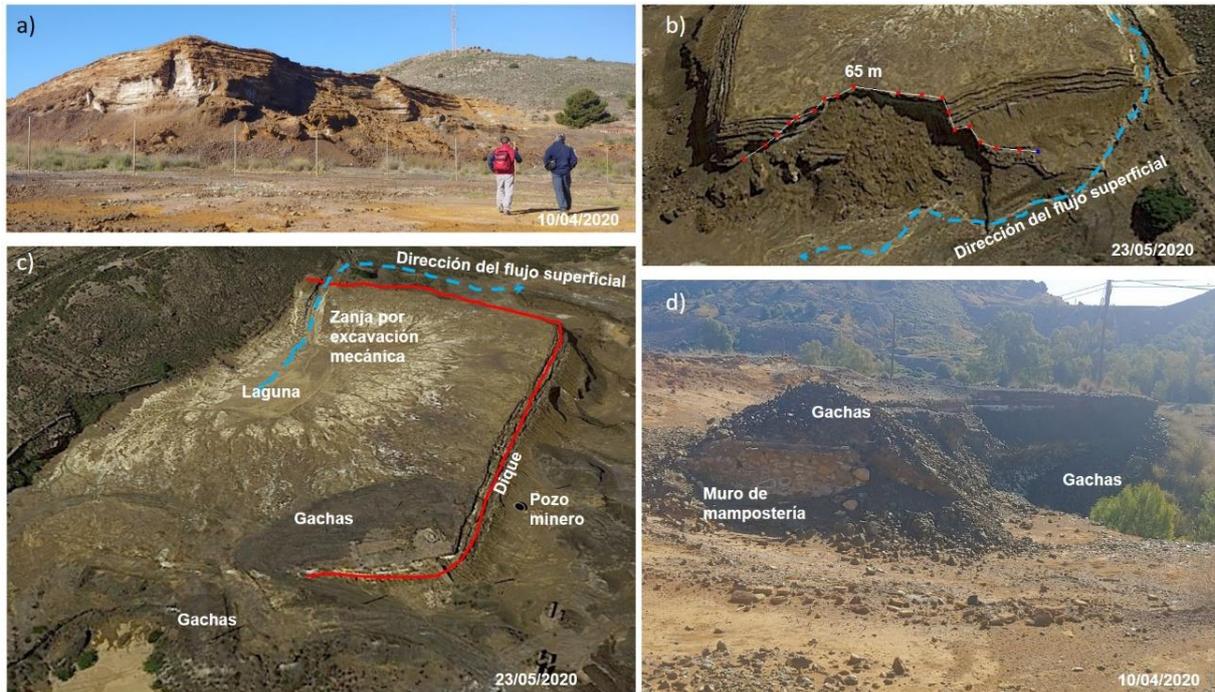


Figura 2. a) Vista panorámica de la zona norte del dique y de la cerca perimetral que la rodea, b) deslizamiento con una longitud en cabecera de 65 m, c) una vista de la superficie de la presa donde se aprecian las principales características y la abundancia de los precipitados de sulfatos en superficie y d) dique de mampostería y zona de deslizamiento donde el dique esta con ángulo invertido por socavamiento. La coloración blanca que aparece en todas las fotos responde a la precipitación de sulfatos integrados por minerales generadores de acides, resultado del proceso de meteorización de los sulfuros contenidos en los lodos mineros.

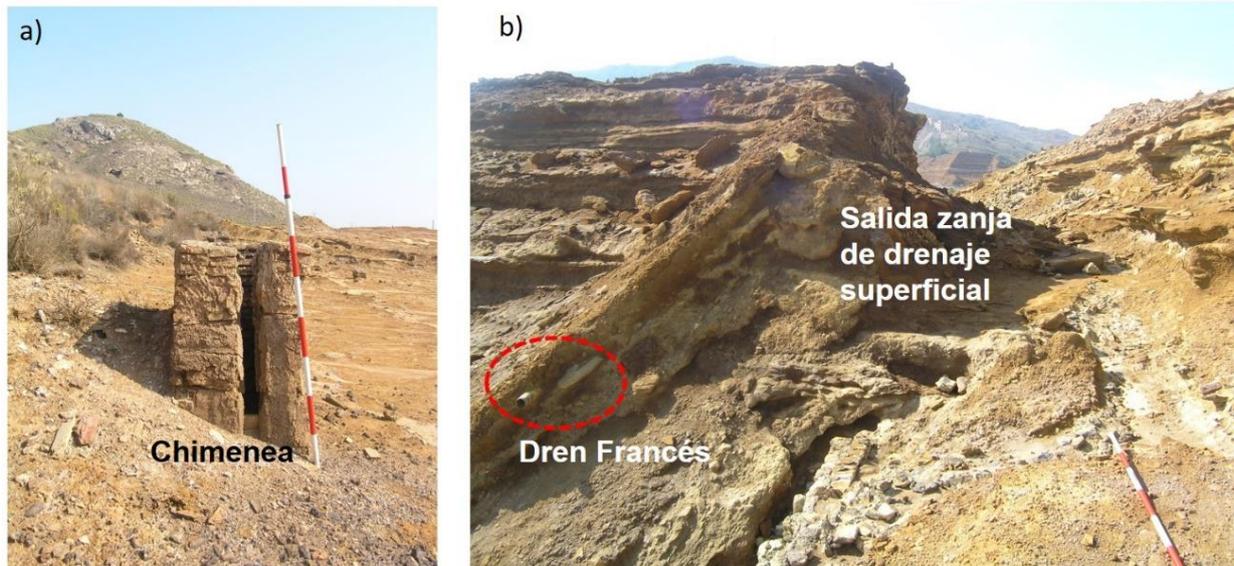


Figura 3. Sistema de drenaje de la Presa El Descargador II.

El material contenido en el vaso de la presa fue depositado por el método de relleno hidráulico. El material se depositaba en el dique con una ratio sólido líquido de 40/60 aproximadamente (García, 2004; Rodríguez y Gómez de las Eras, 2006, Rodríguez et al., 2011, Alcolea, 2015; Caparrós, 2017). La retención de los sólidos en el interior del dique se realizaba con una pared construida con madera (método arcaico).

Hay sectores del dique construido con material de mampostería en la zona norte y este, algunos sectores del dique están cubiertos con escoria de fundición (Figura 2d). El material que alberga El Descargador II está constituido principalmente por estériles de proceso metalúrgico de flotación (lodos mineros), y en un sector al SE, por escorias de fundición resultado de la extracción de plomo, conocidas localmente como “Gachas”. También existen zonas con acumulación de materiales de construcción.

La configuración geométrica de la instalación es rectangular en planta, de aproximadamente de 100 metros ancho x 190 metros largo. La zona Oeste de la instalación apoya en un talud de roca que es paralelo al depósito longitudinalmente. El espesor de los estériles aumenta de Sur a Norte con la disminución de la cota del terreno natural, alcanzando un espesor máximo en la zona Noreste de aproximadamente 18 metros (Figuras 2a, b y c). Los taludes que se encuentran en su estado original tienen una pendiente media de 42°. En las zonas con deslizamientos y caída de bloques la pendiente puede ser superior a los 70°. Se estima que el volumen de la instalación es de aproximadamente 200.000 m³ (CN IGME CSIC, García 2004, IGME, 2011; ERM 2018).

La estabilidad de los taludes es mala. Se observan deslizamientos, al parecer resultado del socavamiento mecánico debido a la erosión eólica e hídrica y, en algún sector, probablemente a la actividad antrópica. También hay grietas de tracción en el Noreste de la presa y en zonas próximas al talud.

En el vaso de la presa se observa la existencia de diques de arena indicativos de que la presa sufrió procesos de licuefacción en el pasado (Figura 4a-d) (Rodríguez et al; 2021). Se observa cómo los diques de arena cortan verticalmente los finos estratos de lodos mineros (Figura 4b). La continuidad lateral de los diques de arena se observa en la zanja de drenaje, donde pueden verse a un lado y al otro del talud de la zanja. El espesor de los diques es siempre creciente de abajo hacia arriba, indicativo de la dirección del flujo del material licuado. Puede observarse bien la diferencia entre lo que son las grietas de desecación y los polígonos que conforman los diques de arena (Figura ac y d).

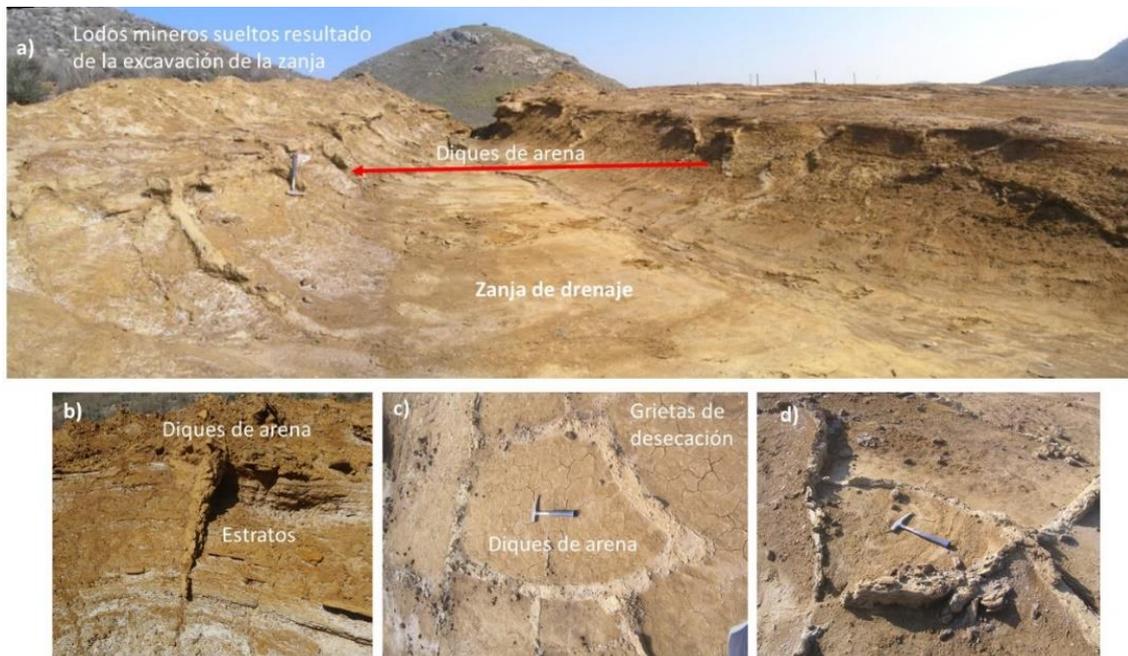


Figura 4. En la imagen se aprecia: a) Vista de la zanja de drenaje y los diques de arena indicativos de que la presa El Descargador II ha sufrido procesos de licuefacción en el pasado, b) dique de arena cortando verticalmente los estratos horizontales y el ligero arqueamiento de los diques en dirección al dique, c) polígono formado por diques de arena y en su interior grietas de desecación y d) diques de arena que

sobresalen sobre la superficie, indicativos de presentar una mayor resistencia a la erosión porque están cementados.

En la presa se puede observar la presencia de minerales secundarios del grupo de los sulfatos (Alcolea et al., 2009, 2012; Alcolea 2015). Se pueden ver los precipitados blancos en los estratos en la superficie del talud, lo que indica que se produce un proceso de flujo horizontal, donde el agua que sale a través de los estratos permeables más arenosos se evapora y precipitan las sales en forma de sulfatos (Figuras 2, 3, 4 y 5). Se pueden observar en la superficie sobre todo en los días posteriores a la lluvia. Estos sulfatos se identifican por sus tonalidades blancas en la pared del talud. La causa fundamental de este proceso de precipitación de sulfatos es el déficit hídrico de la región, donde las precipitaciones medias son de 250-300 mm/año y la evaporación 900-1000 mm/año (García 2004; Robles Arena et al., 2006; Carmona et al; Alcolea, 2015; Alcolea et al, 2015). La magnitud del déficit varía entre 750 y 700 mm/año. En esta región semiárida se producen muy pocos eventos de precipitaciones de 4 a 6 por año de media (Alcolea 2015), pero de gran intensidad.



Figura 5. Ejemplo de precipitado de minerales secundarios del grupo de los sulfatos en la superficie de la presa (Figura 2). También se pueden observar en las paredes del talud y en la zanja de evacuación de la escorrentía superficial (Figuras 2, 3y 4).

5. Consideraciones y análisis del informe presentado por la empresa ERM

5.1. Topografía del terreno

La topografía del terreno que se utiliza no es la más actualizada. Existen dos vuelos Lidar (2011 y 2016, además del realizado en 2022) en el marco de las actuaciones de la IRMA del MITECO. El análisis comparativo de estos levantamientos podría dar un resultado aproximado de la magnitud del proceso erosivo a que están siendo sometidos los lodos mineros almacenados en la presa El Descargador II. Estos procesos erosivos se han visto agravados por la construcción y profundización de la zanja que drena la balsa (Figuras 1, 2 y 3). En este caso, se ha roto la estructura en superficie y puesto en contacto con los agentes de meteorización mayor cantidad de material fresco y desestructurado no oxidado, lo que facilita el proceso de oxidación de los sulfuros y con ello la pérdida de material por erosión y generación de aguas ácidas de mina durante los eventos de precipitación (Figuras 3b y 4a). Estos sulfatos son altamente solubles (Alcolea 2015; Alcolea et al., 2015).

La carga contaminante de esta rambla debido a los procesos erosivos tras el desarrollo de procesos erosivos ha sido estudiada por Marguá et al; 2006; Alcolea 2015 durante un periodo de cuatro años con muestreo in situ y en el laboratorio utilizando la norma DIN 38414-S4. En la Figura 6 se ilustra la concentración de los principales contaminantes que entran al Mar Menor procedentes de las Ramblas de Las Matildes para un periodo de muestro de cuatro años. Además, se muestran el resto de cuencas hidrográficas que drenan el área afectada por los residuos mineros (Figura 1d).

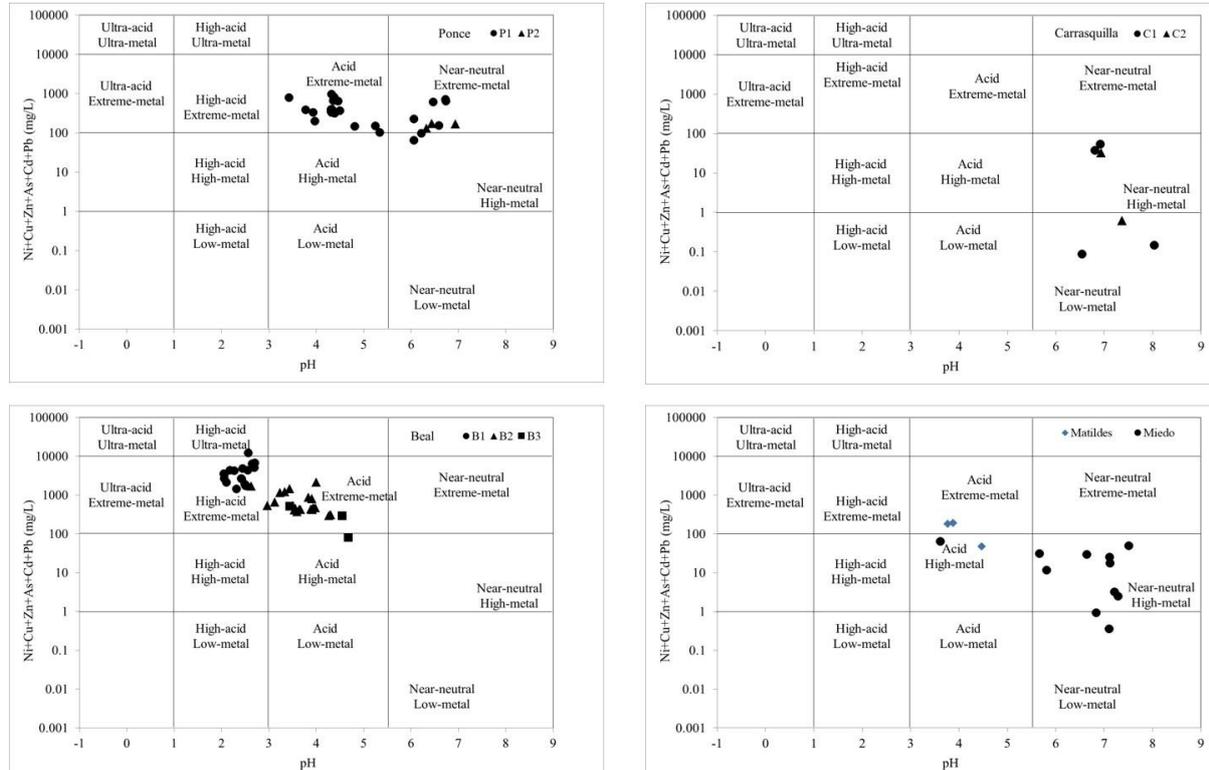


Figura 6. Diagrama de Ficklin mostrando la suma de cinco metales bases más arsénico disuelto en las aguas de escorrentía superficial de cinco ramblas localizadas en la zona que es directamente afectada por los residuos de la actividad minero-metalúrgica y que vierten sus aguas a la LMM, vertiente Norte. Cada uno de los puntos corresponde con un evento de precipitación y escorrentía (tomado de Garcia et al; 2018).

Como se puede apreciar la concentración de metales en las aguas de escorrentía superficial de la rambla de Las Matildes se clasifican de acuerdo al diagrama de Ficklin como aguas acididad con una carga metálica que varía entre extrema y alta (Figura 6).

5.2. Cartografía geológica

La cartografía geológica de detalle de la presa de lodos mineros El Descargador II no se ha realizado o por lo menos no aparece en el informe. Se realiza una descripción general de la geología (Anexo 1, páginas 11-12/17, Informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte II). Este aspecto es de vital importancia por la diversidad de materiales que conforman el dique de la presa y los diferentes residuos que se localizan en su entorno y en un sector del vaso de la presa de residuos (Ver Anexo 1 Fotografías de las cajas de sondeo y la descripción de la columna litológica). Es muy importante tener definida las unidades de los materiales además la presentación de los perfiles geológicos estructurales presentes donde se incluyen los materiales que conformen la presa y la fundación. Los perfiles deberían correlacionarse con el estudio

geofísico e in situ aspecto que no se refleja en la memoria. Solo se anexan las fotos de las cajas y las columnas litológicas de los pozos con su correspondiente descripción.

5.3. Caracterización geotécnica de los materiales

El número de análisis es limitado y no es representativo de los diferentes materiales que hay la presa de residuos mineros, pues en ningún caso se caracteriza el material del dique y de la fundación, aunque desde el punto de vista geofísico se define cuatro unidades. Tampoco se realizan ensayos de caracterización de la permeabilidad hidráulica saturada o no saturada de los materiales. En el informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte III se recogen fotografías de 11 puntos de observación, pero en ningún caso se hace un análisis profundo y se representa en una cartografía los aspectos observados. Por ejemplo, se muestran la abundancia y predominancia de los diques de arena en la presa, peor en ningún momento se muestrearon y se analizaron, no se tomaron muestras para el análisis de los materiales del talud que es donde se manifiestan los mayores problemas de estabilidad estructural.

5.3.1. La granulometría

La granulometría de estos materiales no se ha determinado con el método más adecuado. En el caso de materiales como estos (lodos mineros) con granulometría generalmente inferior a dos mm como se representa en las muestras analizadas (Tabla 1) y densidades de partículas sólidas superiores a $2,8 \text{ g/cm}^3$, lo correcto es hacer la granulometría del material sólido con diámetro menor de dos (2) milímetros por el método láser (Rodríguez, 1997, 2002, Merkus, 2009; Caparrós, 2017). Si se analizan los datos de la Tabla 1, cinco de las siete muestras analizadas tienen un diámetro de las partículas inferior a 2 mm, una con el 98% y una con el 56% (Figura 7), además la densidad de las partículas sólidas es superior a 3 g/cm^3 en todas las muestras. El hecho de realizar la granulometría por sedimentación para el material fino y en especial para la fracción inferior a 400 micras puede conducir a un error de hasta el 50% (Rodríguez, 1997, 2002). Además, el método de representación usando triángulos no es el más adecuado en los proyectos de ingeniería, es más idóneo hacerlo en escala logarítmica, que es el estándar internacional utilizado en el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS) en los estudios de ingeniería.

Si analizamos la Figura 7 podemos ver la limitación del ensayo granulométrico por sedimentación, solo considerando cinco fracciones en los lodos mineros. Como se observa, la información aportada para las partículas finas, que son las que tiene una mayor incidencia en la estabilidad geotécnica estructural, en el tema de riesgo ambiental, así como en las propiedades hidráulicas de los lodos mineros, es limitada. En consecuencia, no se pueden hacer estimaciones a partir de los resultados, siendo uno de los ensayos geotécnicos de identificación más importante en el estudio de presas de lodos mineros. El ensayo granulométrico determina la línea a seguir en la investigación y los métodos que se deben adoptar para su caracterización en el laboratorio e in situ. En la Tabla 1 se muestra la calificación de los lodos mineros considerando el SUCS y AASHTO. La segunda no es aplicable para las tres primeras muestras. Al ser la granulometría incompleta, no se pueden determinar ni clasificar los lodos mineros de acuerdo a su coeficiente de uniformidad, curvatura, etc.

Conociendo la granulometría de la fracción fina y su diámetro D_{10} se puede estimar la altura capilar, la permeabilidad hidráulica saturada (Hazen, 1892), no saturada, la curva de retención, etc. Estos parámetros son de vital importancia para poder definir, en el caso de cierre, la tipología de cobertura a colocar en la supervise de la presa. Normalmente en estos sistemas semiáridos una cobertura correcta son las que consideran los coeficientes de almacenamiento y liberación en el suelo, pero con esta información es muy difícil definir las correctamente.

Conociendo bien la granulometría se pueden determinar otras propiedades que no se determinan en el trabajo de investigación que se resume en el informe. La gráfica de la Figura 7 nos indica que seis de las muestras analizadas no siguen el mismo comportamiento de distribución granulométrica. La granulometría unida a otras propiedades es clave para determinar la zonificación espacial de la presa (vertical y en planta) a partir de la cual se realiza el modelo conceptual de funcionamiento del sistema y se puede elegir el modelo constitutivo más adecuado para evaluar el comportamiento de los materiales. Esto es esencial para realizar el análisis de la estabilidad geotécnica utilizando los modelos numéricos que mejor se ajusten al comportamiento real de las presas de lodos mineros.

Tabla 1. Resultado de caracterización de los materiales con ensayos de laboratorio.

MUESTRAS Nº	MB18-0460	MB18-0461	MB18-0462	MB18-0463	MB18-0464	MB18-0465	MB18-0466
Situación	SU-01	SU-01	SU-02	SU-02	SU-03	SU-03	SU-03
	ST-1	ST-2	ST-1	ST-2	SPT-1	ST-1	SPT-3
Tipo de muestra	SHELBY	SHELBY	SHELBY	SHELBY	SPT	SHELBY	SPT
Profundidad (m)	2 a 2.6	7.2 a 7.8	1.8 a 2.4	6 a 6.6	2.4 a 3	6.6 a 7.2	13,2 a 13.8
Clasificación USCS	SM	SM	SM	CL	ML	ML	SM
Clasificación ISO	siSa-clSa	siSa-clSa	siSa-clSa	Si-Cl	saSi-saCl	Si-Cl	sasiGr-sadGr
Clasificación AASHTO				A-6 (10)	A-4 (4)	A-6 (14)	A-1-b (0)
HUMEDAD							
Nº determinaciones		3		3		3	
Contenido de humedad (%)	5,9	22,0	14,1	44,9		41,0	
DENSIDAD							
Densidad aparente (g/cm ³)	1,85	1,99	1,67	1,84		2,00	
Densidad seca (g/cm ³)	1,75	1,63	1,46	1,27		1,42	
DENSIDAD REL. PARTÍCULAS SÓLIDAS							
Densidad relativa part. sólidas (g/cm ³)	3,610	3,258	3,006	3,253		3,197	
GRANULOMETRÍA TAMIZADO							
Pasa # 20 mm, %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,6
Pasa # 6,3 mm, %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	80,9
Pasa # 2 mm, %	100,0	100,0	100,0	100,0	98,8	100,0	56,6
Pasa # 0.63 mm, %	97,9	99,3	98,7	99,9	96,0	100,0	33,7
Pasa # 0.063 mm, %	32,5	31,2	30,8	86,9	73,2	87,6	16,1
LÍMITES DE CONSISTENCIA							
Límite líquido, LL (%)				34,9	31,6	39,5	24,1
Límite plástico, LP (%)				24,0	24,8	25,7	21,0
Índice de plasticidad, IP (%)	NP	NP	NP	10,9	6,8	13,8	3,1
CORTE DIRECTO SUELOS							
Reamasado probeta	SI		SI				
Tipo de ensayo	CD	CD	CD	CD			
Φ' (°)	38,1	30,9	24,4	23,3			
C' (kPa)	0,0	17,8	27,6	16,6			
TRIAxIAL SUELOS							
Tipo de ensayo						UU 1.5'	
Φ _u (°)						0,0	
c _u , kPa						49	

5.3.2. Humedad y grado de saturación

En todos los sondeos y en el informe se reporta que no fue determinado el nivel freático en ninguno de ellos (Informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte V). En ninguna de las muestras analizadas en el laboratorio se determinó el grado de saturación en las que se midió la humedad, a pesar de que en dos

de ellas la humedad supera el 40%. En el sondeo SU-02 se puede observar un gradiente de la humedad desde 1.8 a 6.6 metros en la vertical, pasando desde 14.1% al 44,9% de humedad. El sondeo SU-03 muestra una humedad de 41%. Al no tener muestreos continuos es muy difícil poder realizar una valoración del estado de saturación de la presa en su interior. Además, no se correlaciona los resultados de geofísica con los datos físico-mecánicos obtenidos en las muestras de laboratorio y los sondeos.

Sin embargo, si consideramos los datos de la Tabla 1 y determinamos el grado de saturación (Tabla 2) podremos comprobar que hay una muestra tomada en el sondeo SU-03 a la profundidad de 6.6-7.2 metros que presenta una humedad del 41% y una saturación superior al 100%. En el caso del sondeo SU-02 a la profundidad de 6.0-6.6 metros, la humedad es del 44.9% y el grado de saturación 93.54%. Estos resultados sobre la existencia de horizontes saturados en la profundidad de las presas de lodos mineros son coherentes con los reportados en la literatura científica por diferentes autores (Oldecop et al., 2011; Rodríguez y Oldecop, 2011).

Tabla 2. Determinación del grado de saturación (S_r), índice de poros e y porosidad (n) considerando los datos de la Tabla 1, tomados del Informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte IV. P: profundidad, w: humedad gravimétrica, γ_d : densidad seca y G_s : densidad de las partículas sólidas.

Sondeo	P(m)	w	e	n	γ_d (g/cm ³)	G_s (g/cm ³)	S_r	S_r (%)
SU-01	2-2,6	0,06	1,06	0.52	1,75	3,61	0,20	20,04
SU-01	7,2-7,8	0,22	1,00	0.50	1,63	3,26	0,72	71,76
SU-02	1,8-2,4	0,14	1,06	0.51	1,46	3,01	0,40	40,03
SU-02	6,0-6,6	0,45	1,56	0.61	1,27	3,25	0,94	93,54
SU-03	6,6-7,2	0,41	1,25	0.56	1,42	3,20	1,05	104,74

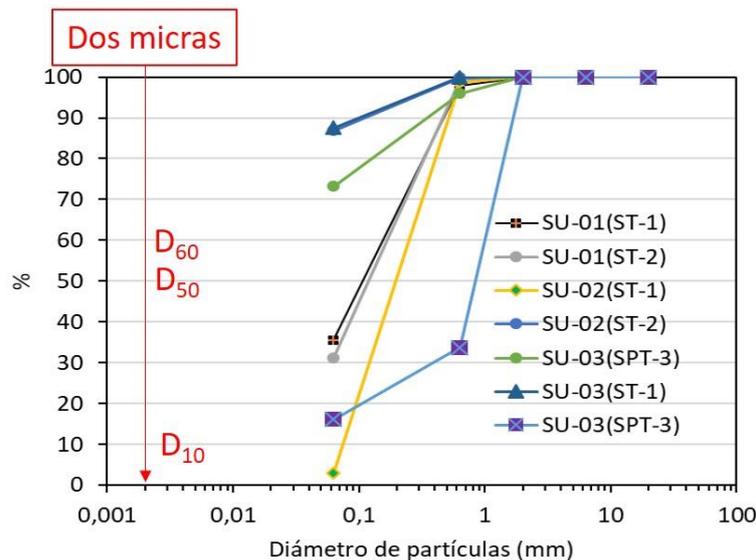


Figura 7. Distribución granulométrica de los lodos mineros de la presa EL Descargador II. El gráfico ha sido elaborado por los autores del CN IGME CSIC con los datos de la Tabla 1 recogida en el informe de la empresa ERM.

5.3.3. Determinación de las propiedades índices

En el caso de las densidades se aprecia que, a pesar de tener una densidad de las partículas sólidas superior a tres gramos por centímetro cúbico, las densidades aparentes y secas siempre son inferiores a

2 gramos por centímetro cúbico. Esto muestra la existencia de materiales con una porosidad superior al 50% (Tabla 2).

Los límites de consistencia o límites de Atterberg se analizaron para seis muestras, tres de ellas dan valores no plásticos a pesar de que su contenido de finos es superior al 30%. Tres de ellas dan valores de plasticidad muy bajos (Tabla 1), aunque en tres de ellas los contenidos de fino superan el 73% y en una sola el 16.1%.

5.4. Estudio geofísico

La Figura 8 se muestra el trazado de los perfiles geofísicos realizados durante la investigación. Como principal limitación del estudio, hay que señalar que se utilizó una distancia entre electrodos de 5 metros, lo cual no es adecuado para estructuras como la presa de lodos mineros El Descargador II, debido a su estratificación y variabilidad espacial de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas en las direcciones horizontal y vertical. En este caso, lo correcto sería hacer el estudio con un espaciamiento entre electrodos de uno o dos metros. Si se usa esta separación, se pueden determinar las zonas de flujo, zonas de tuberías de drenaje y zonas saturadas. Las capas sedimentarias observadas en la cartografía in situ van desde milimétricas hasta decenas de centímetro, disminuyendo su espesor y granulometría desde el dique hacia el interior de la presa (laguna de decantación, Figura 2). Esto se puede ver con claridad en las zonas del dique, en la superficie erosionada y en la zanja de evacuación existente en la presa, donde se observan los diques de arena que cortan verticalmente a los finos estratos de lodos (Figura 2 y 4).

El estudio geofísico por SR delimita la existencia de cuatro unidades o niveles (UG-1, UG-2, UG-3 y UG-4) dentro de los perfiles estudiados (Figura 8) considerando los resultados de la Sísmica de Refracción (SR) y la Tomografía Eléctrica (ERT), pero solo se presentan en el informe las imágenes correspondientes a un perfil por ensayo (SR-1 y ERT-1, Figura 8b y c, Informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte II, páginas 20-23). Esta información es limitada, pues se puede hacer un perfil pseudo 3D, donde se representen las diferentes unidades lo que daría una imagen más objetiva de la situación y distribución de las diferentes unidades. Además, el Perfil de ERT-1 solo muestra la existencia de 3 unidades (UG-1, UG-2 y UG-3), ósea no es representativo de lo que se afirma en el informe. En el caso de los perfiles de polarización inducida tampoco se correlaciona con las mencionadas unidades de las cuales señalamos alguno de los datos que se plantean en el Informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte II.

1. La unidad UG-1 denominada lodos mineros se ha encontrado en todos los perfiles ERT de forma continua con valores inferiores a 30 Ohm/m, este es una escala de valores con un intervalo muy grande para poder ver la existencia de variaciones en el perfil en la vertical y horizontal, además de que no se muestran los otros dos perfiles. Se le axina una potencia de 9 a 20 metros detectados en los perfiles ERT 2 y ET3 los cuales no se incluyen en el informe. Esta unidad se representa en el perfil con colores azules, pero a calidad de la imagen es mala (Figura 8c). por lo que es difícil interpretar mejor los resultados

2. La UG-2 se encuentra por debajo de la unidad UG-1. El contacto con la UG-1 es subhorizontal con resistividades entre 30-250 Ohm/m. se dice que el espesor aumenta hacia el SW, pero no se especifica su potencia.

3. La UG-3 se encuentra por debajo de la unidad UG-2. Presenta valores de resistividades mayores a 250 Ohm/m. La unidad se detecta en el SW y va desapareciendo hacia el SW. Se le dice en el informe que la potencia puede alcanzar 15 m.

4. La UG-4 se encuentra por debajo de la unidad UG-3 y 4.

En ningún caso en la definición de las unidades se tiene en cuenta los resultados de la Polarización Inducida (IP), de la cual se muestra el perfil dos (IP-2). Esto es un aspecto importante pues se debe realizar la investigación geofísica y comparar los resultados en cada uno de los perfiles que se han obtenido tanto por sondeos como por los métodos geofísicos, así como las características físico-mecánicas.

Otras de las limitaciones es que con el ensayo geofísico se estima el valor del Módulo de Young pero en ningún caso se ha correlacionado los resultados geofísicos con los ensayos in situ y de laboratorio (Tablas 1, 2 y 3 del informe), esto es incorrecto pues se dispone de ensayos SPT los cuales analizaremos a continuación. Se podrá ver en los resultados la enorme diferencia entre los estimados por geofísica y los estimados por pruebas in situ.

Otro de los aspectos es que no se realiza una interpretación de la estructura geológica que revelan los datos geofísicos. La escala de análisis con que se realiza la interpretación y su representación gráfica tampoco es la correcta

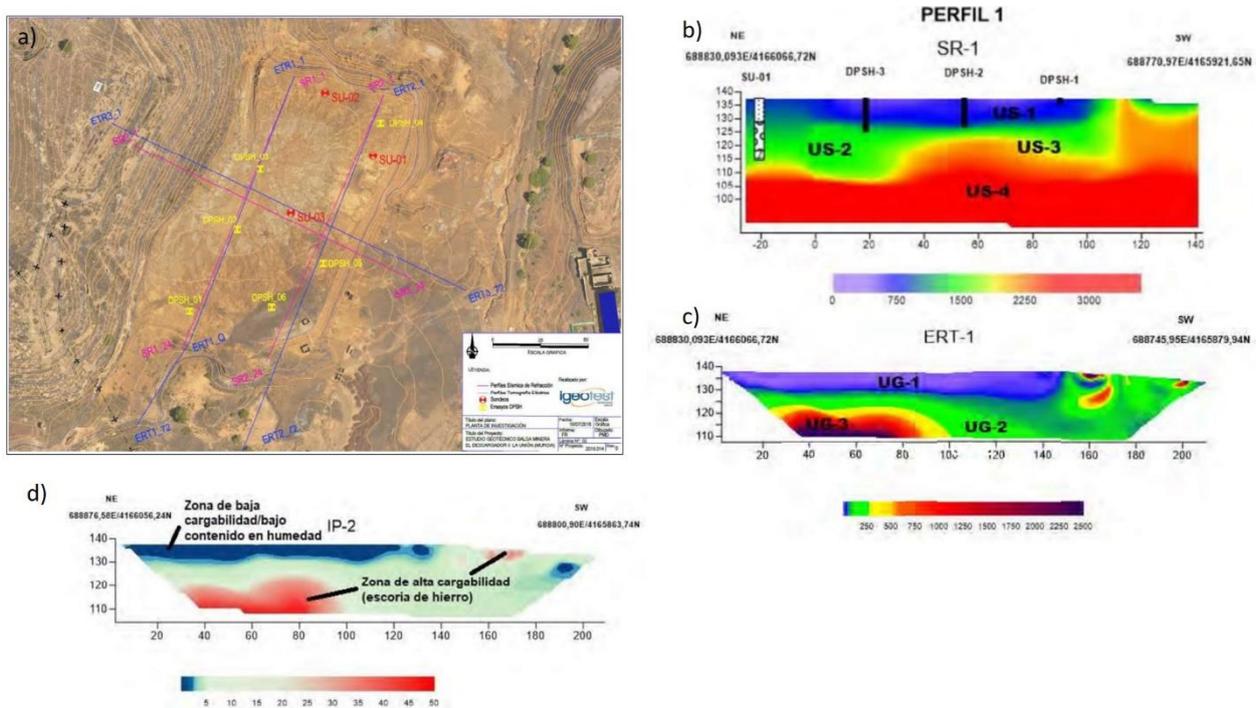


Figura 8. La imagen muestra los perfiles geofísicos y puntos de sondeos y ensayos geotécnicos recogidos en la memoria del informe del 2 de agosto de 2018, realizado por ERM. Obsérvese en la leyenda que estos fueron realizados por otra empresa.

5.5. Ensayos in situ

5.5.1. Ensayos de SPT

Los ensayos SPT son ampliamente utilizados en los estudios geotécnicos. Consideramos que el número de ensayos realizados por sondeo es limitado. Aunque en estos se identifican estratos blandos con muy baja resistencia (Tabla 4, Tabla 2 del Informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte II en pdf, pág. 9/17), estos datos no se interpretan correctamente. Hay que señalar que estos resultados dan un valor medio para 60 cm. En el caso de las presas de lodos mineros esto es más complicado de interpretar, pues en ese espesor podemos encontrar decenas de estratos (Figuras 2 y 3). La estratificación es debido a la naturaleza de formación de estos tras el vertido de los lodos mineros que provoca una segregación de las partículas sólidas desde la zona de descargas pasando por la de transición hasta alcanzar la laguna de decantación. Tras este proceso se produce la sedimentación de las partículas sólidas, su posterior consolidación y secado por evaporación o filtración hacia las capas inferiores.

Tabla 3. Resultados de los ensayos geofísicos

LITOTIPO	VP (m/s)	VS (m/s)	Módulo Corte MPa	Módulo Youngs MPa	Módulo Bulk MPa	Ripabilidad
US1 (Relleno). RELLENOS CLASE D	300-750	280-350	149	420-1500	150-870	Excavable
US2 (arenas gravas). SUELOS MUY COMPACTOS CLASE C	700-1.300	370-750	260-1000	750-2900	720-6000	Ripable
US3 (Contacto Aluvial-Roca Blanda). ROCAS BLANDAS CLASE C	1.500-1.800	370-750	260-1000	770-3100	5000-9000	Umbral Ripabilidad
US4 (ROCA CLASE B)	2500	900	1500	4300	10000	No Ripable

Tabla 4. Resultados SPT (Informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte II en pdf, pág. 9/17).

ENSAYO/ MUESTRA	TIPO	SONDEO	RECUPERACIÓN	GOLPEO	PROFUNDIDAD (m)	
					DESDE	HASTA
ST-1	Shelby		0,6	-	6,60	7,20
SPT-1	SPT+UD	SU-03	0,45	2/1/1/2	2,40	3,00
SPT-2	SPT c		-	3/3/5/6	11,40	12,00
SPT-3	SPT+UD		0,45	11/9/11/12	13,20	13,80
ST-1	Shelby		0,6	-	2,00	2,60
ST-2	Shelby	SU-01	0,6	-	7,20	7,80
SPT-1	SPT c		-	7/6/7/8	10,20	10,80
ST-1	Shelby		0,6	-	1,80	2,40
ST-2	Shelby	SU-02	0,6	-	6,00	6,60
SPT-1	SPT c		-	8/50/R	12,00	12,30

(10.20m) Material blando

(0.60m)

*Shelby: muestra inalterada extraída con tubo tipo shelby
SPT+ UD: Ensayo de Penetración Dinámica Estándar y toma de muestra alterada
SPT c: Ensayo de Penetración Dinámica Estándar ejecutado con puntaza ciega

5.5.2. Ensayo de penetración dinámica (DPSH)

Los ensayos de penetración dinámica son algo más representativos en este tipo de estructuras, pues la medida se realiza para intervalos de 20 cm en la vertical del sondeo. En este caso se realizaron seis ensayos

y se puede observar como el número de golpes es casi siempre inferior a 10. In situ se aprecia claramente que los lodos del dique de la presa están estratificados y cementados, pero a la que penetramos en el interior en dirección del dique hacia la laguna de decantación los lodos mineros estratificados tienen poca resistencia (Figura 5, Tabla 4). El perfil vertical muestra capas con diferentes valores de resistencia a la penetración dinámica, este es un aspecto importante que corrobora la estratificación que caracteriza a los lodos mineros en el interior de la presa (Figura 9).

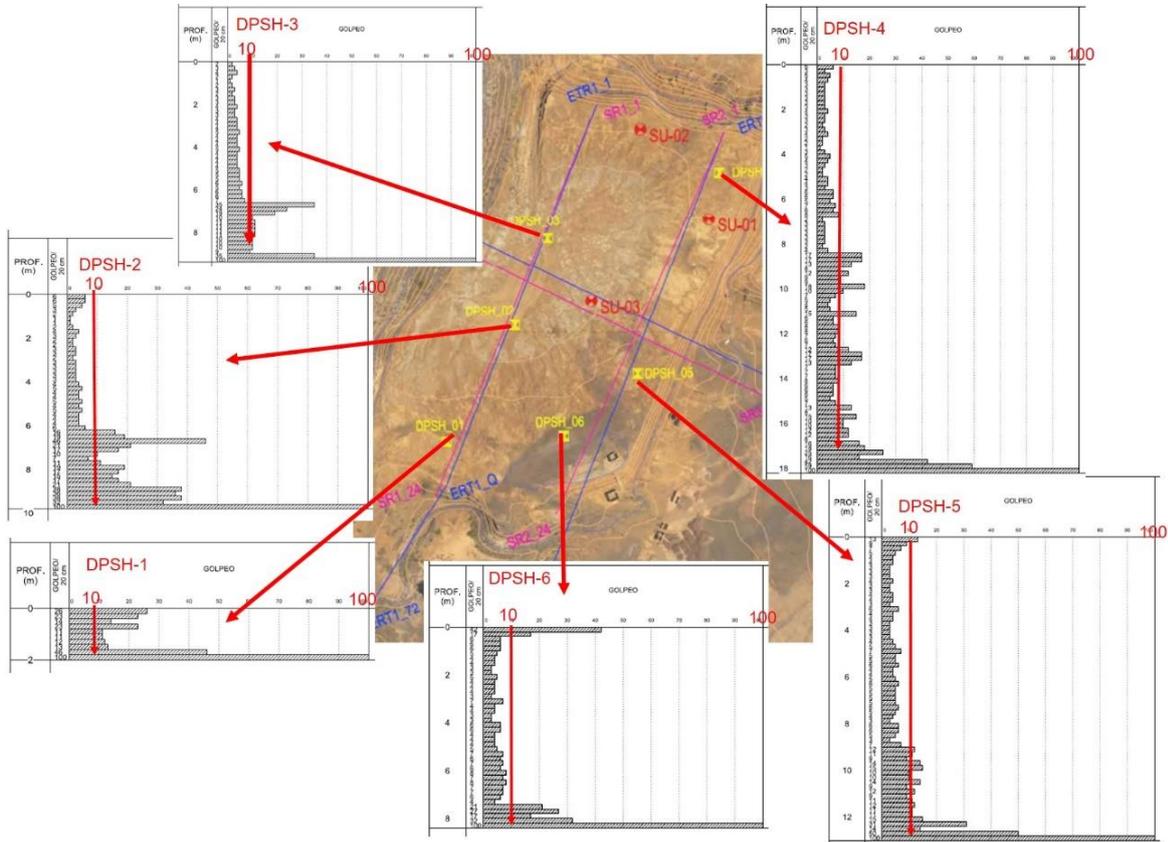


Figura 9. Resultados del ensayo de DPSH en la presa El Descargador II (Figura elaborada por los autores del CN IGME CSIC con los datos e imágenes del Informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte V en pdf, Anexo 2, pág. 20-25/28). La línea vertical roja en cada figura determina el límite del número de golpes igual a 10.

En la sección 9.1 “Relleno con predominancia de arenas limosas”, página 25 del informe caracterización del ERM sobre DESCARGADOR II - Parte IV en pdf, se expresa que la compacidad de este material es de muy floja a medianamente densa, con valores de N_{30} comprendidos entre 3 y 13 (valores obtenidos de los ensayos SPT y de los golpes N_{20} obtenidos en los ensayos DPSH corregidos según $N_{30} = N_{20} \times 1,5$). Entonces, si los ensayos SPT y los DPSH corregidos indicaron la presencia de materiales blandos en el denominado Nivel -1, con espesores de hasta 6 metros, ¿Por qué no se tuvo esto en cuenta en los modelos utilizados para el análisis de la estabilidad geotécnica?

5.5.3. Correlación entre los ensayos SPT vs Ensayo de penetración dinámica (DPSH)

Aunque existen numerosos estudios que relaciona los resultados de DPSH con los de SPT (Dahlberg, 1976; Dapena y Lacasa, 2000; López-Chinarro et. al., 2007; Aravena y Jaramillo, 2014; Salamanca-Medina et al., 2021), se utilizó una correlación empírica ($N_{30} = N_{20} \times 1,5$) obtenida a partir de experiencias prácticas de ensayos en suelos arenosos de sitios específicos, que difieren mucho de los lodos mineros. Aun así, el

número de golpes obtenido con la corrección fueron bajos, y esto no fue considerado en los modelos de análisis.

Por otro lado, es importante señalar que en los ensayos DPSH se produce una gran pérdida de energía debido a la fricción que se genera entre los materiales y el fuste de las varillas, por lo que este tipo de ensayo se recomienda hasta profundidades de exploración en el torno a los 10 metros y, de ser posible, aplicando un factor de corrección por fricción (Aravena y Jaramillo, 2014).

Si existen numerosos estudios que relaciona los resultados de DPSH con los de SPT, entonces, **¿Por qué motivo teniendo seis ensayos de DPSH no se correlacionaron con los de SPT?** Además, no se tuvo en cuenta que en los resultados del SU-03 y SU-01 se detectaron materiales blandos con número de golpes (N_{SPT}) inferior a 10 (Tabla 4) similar a los ensayos DPSH (Figura 9).

Para analizar la relación entre N_{SPT} y N_{DPSH} se han usado diferentes formulaciones matemáticas considerando la tipología de materiales descritas en los sondeos (Tabla 5), cuyos resultados se muestran en la Figura 10. Se puede comprobar la existencia de un material blando con un comportamiento de alternancia que refleja la estratificación de los lodos mineros sedimentados en el vaso de la presa.

Como se puede ver, los sondeos DPSH-04, DPSH-05 y DPSH-06 presentan un material de muy baja resistencia mecánica aspecto que no se ha tenido en la caracterización y zonificación de los materiales que se han considerado en el análisis de estabilidad geotécnica (Figura 10). Se puede observar la existencia de una costara superficial sobre los lodos mineros en el sondeo DPSH-05, esto fue comprobado in situ. En el sondeo DPSH-06 se observa que la capa superior tiene una mayor resistencia, debido a la presencia de material mezclado con gachas.

Los sondeos DPSH-02 y DPSH-03 que se encuentran en la laguna de decantación inferior a diez golpes hasta los seis metros y en profundidades similares. En profundidad sobre los siete metros se aprecia una capa común para los dos sondeos.

En el caso del sondeo DPSH-01 se obtiene un comportamiento totalmente diferente, debido a que la materia es una mezcla de lodos y Gachas. Además, en esta zona el espesor de la presa es muy pequeño. Existe en la pared del talud una gran concentración de precipitados de sulfatos (ver anexo 1). Los gráficos generados por los autores del trabajo del CN IGME CSIC a partir de los datos contenidos en el informe de la empresa ERM, muestran que existe un volumen importante de los materiales que conforman los lodos mineros sedimentados en la balsa que son blandos, con número de golpes inferior a 10 (Figuras 9 y 10).

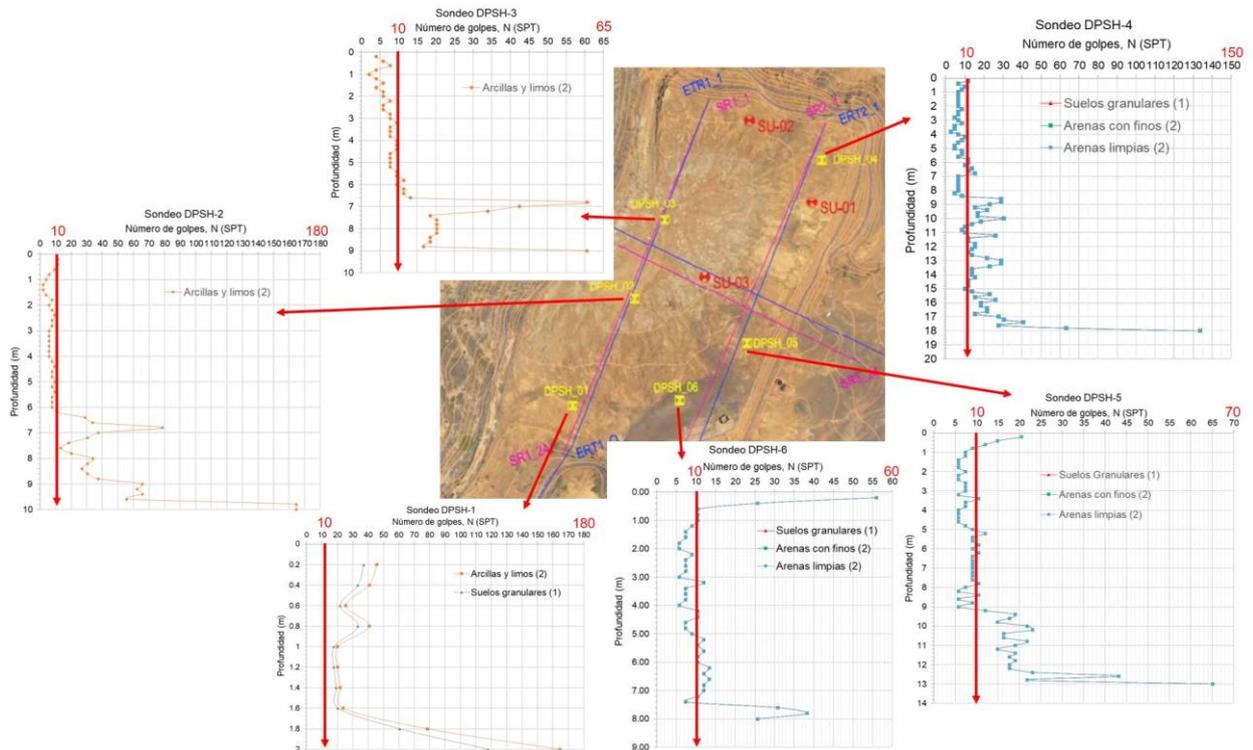


Figura 10. Correlaciones entre los ensayos SPT vs Ensayo de penetración dinámica (DPSH) obtenidas mediante las formulaciones matemáticas de la Tabla 5. (1) López-Chinarro et al., 2007; (2) Salamanca-Medina et al., 2021. La línea vertical roja en cada figura determina el límite del número de golpes igual 10.

Tabla 5. Formulaciones matemáticas de la correlación entre N_{SPT} y N_{DPSH}

Referencia	Correlación	R ²	Tipo de suelo
Dahlberg, 1976	$N_{SPT} = 25 \cdot \log_{10} (1.22 \cdot N_{DPSH}) - 15.16$	--	Granulares
Dapena y Lacasa, 2000	$N_{SPT} = (13 \cdot \log_{10} N_{DPSH}) - 2$	--	Cohesivos
López-Chinarro et al., 2007	$N_{SPT} = 2.24 \cdot N_{DPSH}^{0.87}$	0.84	General
	$N_{SPT} = 2.25 \cdot N_{DPSH}^{0.86}$	0.87	Granulares
Salamanca-Medina et al., 2021	$N_{SPT} = 2.10 \cdot N_{DPSH}^{0.90}$	0.81	Cohesivos
	$N_{SPT} = 2.29 \cdot N_{DPSH}^{0.88}$	0.95	General
	$N_{SPT} = 2.07 \cdot N_{DPSH}^{0.95}$	0.97	Arcillas y limos
	$N_{SPT} = 2.52 \cdot N_{DPSH}^{0.88}$	0.94	Arenas con finos
	$N_{SPT} = 2.72 \cdot N_{DPSH}^{0.75}$	0.91	Arenas limpias
	$N_{SPT} = 2.75 \cdot N_{DPSH}^{0.81}$	0.88	Gravas

5.5.5. Correlación entre los ensayos SPT vs el módulo de Young vs el ángulo de fricción interna

En la Figura 11 se muestra la correlación directa existente entre el número de golpes del ensayo SPT, el ángulo de fricción interna y el módulo de Young, la cual está demostrada en la literatura científico técnica

nacional e internacional. Como se puede observar para los valores de SPT obtenidos el ángulo de fricción de los lodos mineros estaría entre 28 y 30 grados, lo cual es inferior al valor utilizado en los cálculos geotécnicos (Tabla 6, Figura 11). El módulo de Young no sobrepasa los 10 MPa, lo que no corresponde con lo obtenido en la interpretación de los resultados de las medidas por los métodos geofísicos (Tabla 3).

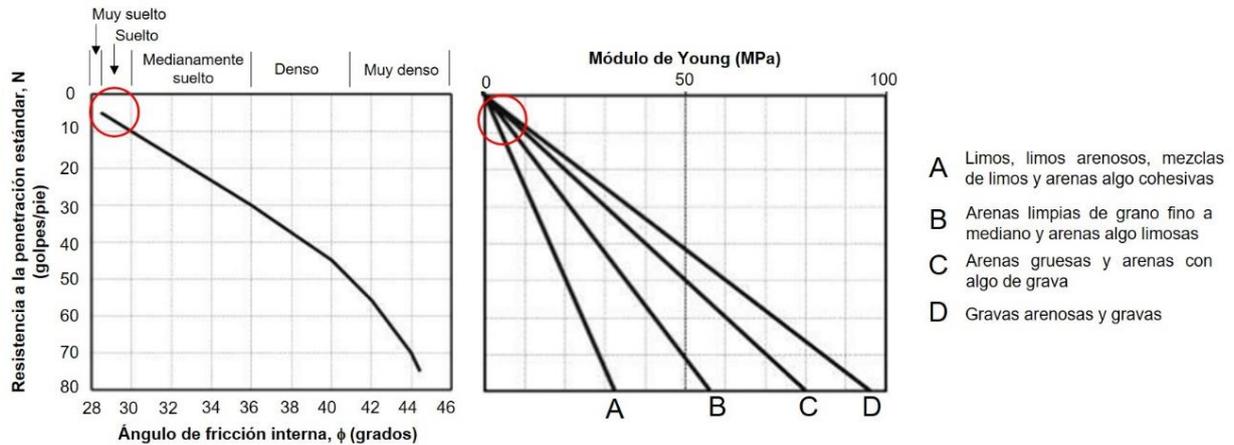


Figura 11. Correlación ángulo de fricción interna y módulo de Young vs número de golpes de la prueba SPT (Terzaghi and Peck, 1967, Schmertmann, 1970; Sowers and Sowers, 1993).

5.5.6. Parámetros de resistencia mecánica de los lodos mineros

En la Tabla 6 se muestran los parámetros mecánicos definidos para las capas de materiales consideradas en el perfil donde se han realizado los cálculos de estabilidad geotécnica.

Tabla 6. Parámetros mecánicos definidos para las capas de materiales

MATERIAL	PARÁMETROS GEOTÉCNICOS		
	DENSIDAD (g/cm ³)	ÁNGULO DE FRICCIÓN	COHESIÓN (kPa)
ARENA LIMOSA (LODO MINERO)	1,85	34°	5
GRAVA ARCILLOSA	1,75	24°	18
TERRENO NATURAL	2,3	45°	100

6. Calculo de estabilidad geotécnica

Los análisis de cálculo de estabilidad geotécnica se realizaron en tres (3) perfiles (01, 02 y 03) (Figura 12). En los perfiles de cálculo se considera la existencia de tres capas de materiales diferentes. Los parámetros geotécnicos utilizados se detallan en la Tabla 6. Consideramos que esta definición no es correcta, teniendo en cuenta la interpretación de los resultados de las pruebas de campo (SPT y DPSH) y de laboratorio.

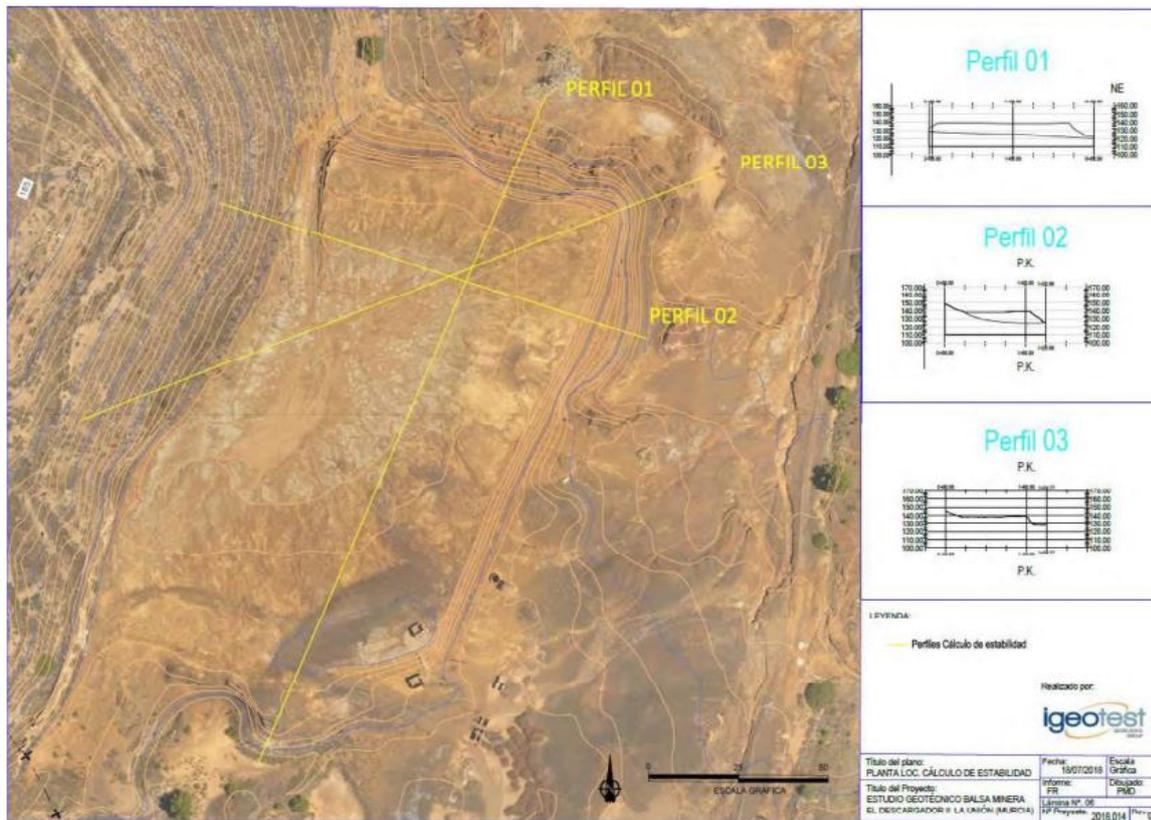


Figura 11. Trazados de los perfiles en los que se realizó el cálculo de estabilidad geotécnica de la presa El Descargador II.

El análisis de la estabilidad de la presa El Descargador II en los tres perfiles señalados se realizó utilizando los métodos de equilibrio límite del software Geo-Studio 2017 y se calcularon los FS en condición estática y pseudo-estática (considerando aceleración de la gravedad ($a_c = 0.073g$), NCSR-02, 2003).

Además, se realizaron análisis de sensibilidad variando los parámetros geotécnicos de los materiales (arena limosa y grava arcillosa), como se muestra en las Tablas 7 y 8. Consideramos que para el estudio esto no tiene sentido físico, porque están mal definidos la tipología de los materiales y sus parámetros de resistencia y deformación.

Tabla 7. Resultados del análisis de estabilidad variando parámetros geotécnicos de la grava arcillosa

Arena limosa (1)	Terreno natural (3)	Grava arcillosa (2)		Factor de Seguridad				
				Mínimo		Talud completo		
				Estático	Con Coef. Sísmico	Estático	Con Coef. Sísmico	
densidad=18kN/ m ³ $\phi=34^\circ$ C=5kPa	densidad=23kN/ m ³ $\phi=45^\circ$ C=100kPa	densidad=17 kN/m ³ C=18kPa	ϕ					
			20	1,1	1,03	1,1	1,03	
			22	1,15	1,07	1,15	1,07	
			24	1,16	1,09	1,2	1,12	
			26	1,16	1,09	1,25	1,17	
			28	1,16	1,09	1,29	1,2	
			30	1,16	1,09	1,33	1,24	
			c					
			densidad=17 kN/m ³ $\phi=24^\circ$	6	0,94	0,88	1,1	0,9
				12	1,08	1,01	1,08	1,01
		18		1,16	1,09	1,22	1,14	
		24		1,16	1,09	1,31	1,23	
		densidad						
		15		1,16	1,09	1,23	1,15	
		17		1,16	1,09	1,22	1,13	
		19		1,16	1,09	1,22	1,13	

Tabla 8. Resultados del análisis de estabilidad variando parámetros geotécnicos de la arena limosa

Grava arcillosa (2)	Terreno natural (3)	Arena limosa (1)		Factor de Seguridad			
				Mínimo		Talud completo	
				Estático	Con Coef. Sísmico	Estático	Con Coef. Sísmico
densidad=17kN/ m ³ $\phi=24^\circ$ C=18kPa	densidad=23kN/ m ³ $\phi=45^\circ$ C=100kPa	densidad=18 kN/m ³ C=5kPa	ϕ				
			28	0,97	0,91	1,13	1,06
			30	1,03	1,08	1,16	1,08
			32	1,09	1,11	1,51	1,4
			34	1,16	1,09	1,2	1,12
			36	1,22	1,14	1,22	1,14
			38	1,25	1,17	1,25	1,17
			40	1,27	1,19	1,27	1,19
			c				
			densidad=18 kN/m ³ $\phi=34^\circ$	0	0,9	0,85	1,16
		2,5		1,03	0,97	1,17	1,1
		5		1,16	1,09	1,22	1,14
		7,5		1,22	1,14	1,22	1,14
		10		1,24	1,16	1,24	1,16
		$\phi=34^\circ$ C=5kPa	densidad				
			16	1,19	1,11	1,24	1,16
			18	1,16	1,08	1,22	1,13
			20	1,13	1,06	1,19	1,11

Con los resultados obtenidos, se concluye que los taludes son estables, pero se determina una zona de posible falla local en los perfiles 01 y 03, donde el factor de seguridad estático es de 1.25 y el pseudo-estático 1.16. En esta zona se propone modificar la geometría del talud, como se muestra en la Figura 13. En los análisis no se consideró la existencia de estratos o zonas de materiales blandos (con No. de golpes obtenidos en los ensayos SPT menores que 10, Tabla 4, Figuras 9 y 10), que pueden constituir superficies

potenciales de falla y son susceptibles a la licuefacción, como lo muestran las evidencias de los discos de arena existentes en el vaso de la presa.

En ninguna parte de la documentación aportada para su revisión se hace referencia a la norma utilizada para establecer los FS adecuados para este tipo de presas de lodos mineros.

Es de señalar que en la presa se encuentra un deslizamiento medio en la zona más alta del talud, varios deslizamientos pequeños y grietas de tracción en la zona más alta al NE del talud, muy cercanos a donde se realizó uno de los sondeos.

No se consideró el efecto de las filtraciones de agua en caso de lluvia ni se realizó análisis tenso-deformacional para evaluar la estabilidad, conociendo la existencia de materiales blandos de muy baja rigidez. Además, el software utilizado (Geostudio) incluye este tipo de análisis mediante elementos finitos.

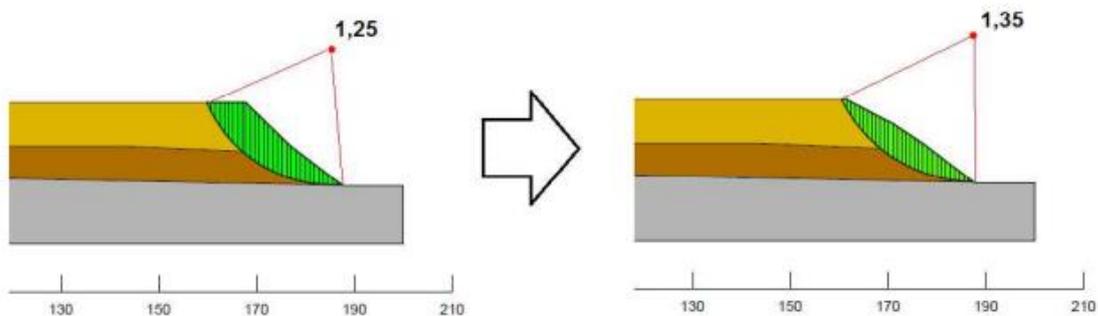


Figura 13. Calculo de estabilidad en condiciones actuales y tras la modificación de la pendiente del talud.

6.1. Sobre las medidas de estabilización

Los objetivos de todos los proyectos de rehabilitación, cierre de una instalación de residuos mineros y en especial las presas de lodos mineros son:

1. Garantizar la estabilidad física de la presa
2. Que el proyecto asimile las deformaciones durante los eventos extremos
3. Evitar la transferencia de contaminantes al medio ambiente

En el Informe ERM sobre DESCARGADOR II - Parte I en la página 17 se plantea textualmente ***“Con las actuaciones descritas no se considera necesaria la remodelación completa del Descargador II ni la construcción de un muro de escollera de sostenimiento a pie del talud, ya que el depósito es estable. Las medidas que se proponen en este informe son necesarias para reforzar esa estabilidad y seguridad”.***

Consideramos que esto no es correcto por varias razones:

1. La presa presenta síntomas de inestabilidad con deslizamientos, erosión eólica e hídrica muy acentuados como lo demuestra las observaciones in situ.
2. El perfil de los materiales definido para el cálculo de estabilidad no se corresponde con los datos obtenidos de las pruebas in situ, con las observaciones y con la cartografía de campo.
3. En el trabajo se considera la instalación como una balsa, pero en realidad es una presa, porque la definición correcta establece que cuando el dique de retención está por encima del nivel topográfico del terreno se clasifica como presa y si está por debajo se clasifica como una balsa (Real Decreto 975/2009).

4. La realización de los cálculos de estabilidad por métodos de equilibrio límite no da respuesta a los diferentes escenarios que se pueden presentar en estas presas, teniendo en cuenta que su cierre es a perpetuidad.
5. El factor de seguridad que se obtiene, incluso con la remodelación propuesta, es inferior a lo establecido en la normativa internacional (FS=1.5) para las presas de residuos o lodos mineros en las que se ejecute el cierre ni la norma española MOPU, 2022. Además, los lodos mineros de la presa se clasifican como residuos peligrosos, pues superan los niveles de fondo de la región y la normativa para suelos contaminados (Martínez-Sánchez y Perez-Sirvent, 2007, Martínez-Pagán et al., 2011).

7. Ensayos y procedimientos necesarios para el análisis de estabilidad geotécnicas de las presas de residuos mineros (tenso-deformacional y equilibrio límite)

Es importante señalar que el cálculo del factor de seguridad a partir de métodos de equilibrio límite debe realizarse utilizando las tensiones obtenidas del análisis tenso-deformacional. Este procedimiento está incluido en los softwares utilizados en el sector minero y la ingeniería civil.

Para evaluar la estabilidad de las presas hay que realizar diferentes ensayos que permitan obtener los parámetros necesarios para realizar un análisis tenso-deformacional del comportamiento de la presa bajo diferentes condiciones establecidas en la normativa: normales, accidentales y extremas. En la Tabla 9 se relaciona el ensayo y los parámetros que se obtienen.

Tabla 9. Ensayos geotécnicos y parámetros que se obtienen para el análisis de estabilidad de una presa de lodos mineros.

Ensayos in situ	Parámetros
Métodos indirectos	
Tomografía eléctrica (TE)	Resistividad
Polarización inducida (PI)	Cargabilidad del terreno
Perfiles de sísmica/ MASW	Velocidad de onda de corte (Vs)
Métodos directos	
SPT	Ángulo de fricción interna y Módulo de Young
DPSH	Ángulo de fricción interna y Módulo de Young
Permeabilidad hidráulica saturada vertical y horizontal	Permeabilidad
Medida de humedad in situ (sonda TDR)	Determina el contenido volumétrico de agua
Ensayos de laboratorio	
Granulometría superior a 2 mm método ASTM o Norma UNE	Clasificación de los materiales Sistema Unificado de clasificación de los suelos o Sistema Europeo
Granulometría por método láser a la fracción inferior a 2 mm	Clasificación de los materiales Sistema Unificado de clasificación de los suelos o Sistema Europeo, Altura capilar
Propiedades índice	Densidad seca, densidad húmeda, densidad saturada, densidad de las partículas sólidas, índices de Atterberg, humedad, grado de saturación, índice de poros y porosidad
Corte directo o triaxial Drenado y no drenado	Ángulo de fricción interna, cohesión y Módulo de Young

Edómetro	Módulo de Young, coeficiente de consolidación, permeabilidad saturada
Curva de retención de secado y mojado	Valor de entrada de aire, valor de entrada de agua

7.1. Análisis, interpretación y correlación de los datos

Para el caso de las presas de lodos mineros es necesario que el procedimiento de investigación tenga una secuencia lógica que incluye:

1. Levantamiento topográfico y geológico de detalle.
2. Todos los perfiles del estudio deben realizarse sobre el mismo trazado, lo que facilitara la correlación de los datos y la información obtenida.
3. Primero se deben realizar los estudios mediante métodos indirectos (Tabla 9)
4. A partir de los resultados obtenidos en el punto dos se realizan los estudios in situ (Tabla 9).
5. A partir de los resultados de los estudios in situ se ha de realizar el muestreo de materiales para su caracterización en el laboratorio (Tabla 9).
6. A las muestras obtenidas se le deben realizar los ensayos definidos en la Tabla 9.
7. Considerando los resultados obtenidos en los puntos anteriores, se hace la interpretación y correlación de los datos.
8. Una vez interpretados y correlacionados los datos, se debe definir el modelo geométrico y constitutivo de los materiales.
9. Realizar la simulación numérica del comportamiento de la presa para las condiciones normales, accidentales y extremas, considerando el efecto de las filtraciones, el comportamiento tenso-deformacional, y todo esto se debe considerar para el cálculo de estabilidad.

8. Conclusiones

El informe carece de los siguientes aspectos:

1. No se realizó una topografía y cartografía geológica de detalle de la presa y su entorno.
2. No se realizó una correcta caracterización geotécnica e hidrogeológica de los materiales.
3. El informe no hace un adecuado análisis, interpretación y correlación de los datos obtenidos in situ (métodos directos e indirectos) y en el laboratorio.
4. Los modelos geométricos, geológicos-geotécnicos, constitutivos y numérico no se corresponden con la situación real de la presa.
5. Por tanto, a partir de lo señalado anteriormente se concluye que la propuesta de estabilización de la presa de lodos mineros El Descargador II es incorrecta y se requiere completar el estudio en base a los señalamientos y calcular la estabilidad de la presa considerando los nuevos resultados.

9. Referencias

Alcolea, A. 2015. Geoavailability of Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the Sierra de Cartagena – La Unión (SE Spain). Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena.

Alcolea, A., Fernández-López, C., Vázquez, M., Caparrós, A., Ibarra, I., García, C., Zarroca, M., Rodríguez, R. 2015. An assessment of the influence of sulfidic mine wastes on rainwater quality in a semiarid climate (SE Spain). Atmospheric Environment, 107, 85–94.

Aravena, S., Jaramillo, M., 2014. Correlación de resultados de ensayos DPSH y SPT en suelos finos. VIII Congreso chileno de Ingeniería Geotécnica. 26 al 28 de noviembre de 2014. www.sochige2014.cl

NSCR, A., Ibarra, I., Caparrós, A., Rodríguez, R. 2009. Study of the MS response by TG–MS in an acid mine drainage efflorescence. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 101, 1161–1165.

Alcolea, A., Vázquez, M., Caparrós, A., Ibarra, I., García, C., Linares, R., Rodríguez, R. 2012. Heavy metal removal of intermittent acid mine drainage with an open limestone channel. *Miner. Eng.* 26, 86–98.

Caparrós A.V. (2017) Rheology of Pb-Zn post-flotation wastes in the Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain). PhD Diss, Polytechnic Univ of Cartagena, Spain. <https://doi.org/10.31428/10317/7012>

Carmona, D.M., Faz Cano, Á., Arocena, J.M. 2009. Cadmium, copper, lead, and zinc in secondary sulfate minerals in soils of mined areas in Southeast Spain. *Geoderma*, 150(1), 150–157.

Dahlberg, R. 1976. Penetration testing in Sweden. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 13, no. 9, p. A110. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90104-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90104-2)

Dapena, E. and Lacasa, J. G. 2000. Relación entre los resultados de los ensayos de penetración dinámica Borros DPSH y el SPT en un suelo arcilloso. *Actas del Simp. sobre geotecnia de las infraestructuras lineales. Soc. Española de Mec. del Suelo e Ing. Geotécnica.*

DIN 38414-S4 (Deutsche Norm). 1984. pp. 464–475.

García, C. 2004. Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena – La Unión (Murcia-España). Ph.D. thesis, Universidad Politécnica de Cartagena, Spain.

García, C., Rodríguez-Pacheco, R, Alolea, L.A. Robles-arna, V. 2018. Evaluación del flujo y transporte de contaminates (ni, cu, zn, as, cd y pb) en el área de influencia del Mar menor (Sierra Minera de Cartagena la Unión y Campo de Cartagena) Technical report Universidad Politécnica de Cataluña, 230 pp.

Hazen, A. (1892). Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration. *Massachusetts State Board of Health*, vol. 24th annual report, pp. 539-556.

IGME (Instituto Geológico y Minero de España). 2011. Inventario de instalaciones mineras abandonadas o cerradas.

Marguí, E., Hidalgo, M., Queralt, I., Rodríguez, R. 2006. Métodos de evaluación del riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos sólidos. In: Rodríguez, R., García Cortés, A. (eds). *Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente*. IGME, Madrid, pp 413–439.

Martínez-Pagán, P., Faz, A., Acosta, J.A., Carmona, D.M., Martínez-Martínez, S. 2011. A multidisciplinary study for mining landscape reclamation: a study case on two tailing ponds in the Region of Murcia (SE Spain). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(16), 1331–1344.

Martínez-Sánchez, M.J., Pérez-Sirvent, C. 2007. Niveles de fondo y niveles genéricos de referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia. Murcia, Spain.

Merkus, H. G. 2009. Particle size measurements: fundamentals, practice, quality (Vol. 17). Springer Science & Business Media.

MOPU. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 2022. Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses.

NCSR-02. 2003. Earthquake resistant building code: general part and construction. Ministerio de Fomento, Spain.

López-Chinarro, J. A., Marín, F. P. and Pugh, R. C. 2007. Propuesta de correlación para los suelos de la cuenca de Madrid entre el golpeo obtenido con ensayos de penetración DPSH y SPT. Revista Digital del Cedex, no. 146, p. 111.

Oldecop L., Garino L., Muñoz, J.J., Rodríguez, R., García C. (2011). Unsaturated behavior of mine tailings in low precipitation areas. En: Unsaturated Soils – Alonso & Gens (eds), 1425-1430. Taylor & Francis Group, London,

Oldecop, L., Rodríguez, R. 2006. Estabilidad y seguridad de depósitos de residuos mineros. In: Rodríguez, R., García Cortés, A. (eds). Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente. IGME, Madrid, pp. 197–243.

Robles-Arenas, V.M., Rodríguez, R., García, C., Manteca, J.I., Candela, L. 2006. Sulphide-mining impacts in the physical environment: Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain) case study. Environ. Geol., 51, pp. 57–64.

Rodríguez R, García C, Zarroca M, Oldecop, L. (2011) Características geológicas y geotécnicas de los lodos de flotación de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE España). Boletín Geológico y Minero 122(2): 127–144.

Rodríguez, R., García, C., Zarroca, M., Roque, C., Linares, R., Oldecop, L. 2011. Características geológicas y geotécnicas de los lodos de flotación de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE España). Boletín Geológico y Minero, 122 (2): 127-144. ISSN: 0366-0176.

Rodríguez, R., García-Cortés, Á. 2006. Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente (No. 11). IGME.

Rodríguez, R., Gómez de las Heras, J. 2006. Los residuos de la industria extractiva en España. Distribución geográfica y problemática ambiental asociada. In: Rodríguez, R., García Cortés, A. (eds). Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente. IGME, Madrid, pp 3–25.

Rodríguez, R., Muñoz, A., Caparrós, V., García, C., Brime, A., Arranz, J., Rodríguez, V., Fernández, F., Alcolea, A. (2021) How to Prevent Flow Failures in Tailings Dams. Mine Water Environ 40, 83–112.

Rodríguez, R., Oldecop, L. 2011. Humedad y estabilidad geotécnica de presas de relaves. Conference paper. DOI: 10.13140/RG.2.2.31849.70248.

Rodríguez, R.L. 2002. Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): influencia del comportamiento hidromecánico. Ph.D. thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, Spain.

Rodríguez, R. 1997. Caracterización de un residuo metalúrgico utilizando técnicas analíticas y experimentales en el laboratorio. Conference: Forum R+D. Manresa, Barcelona, Spain

Salamanca Medina, E.L., López Domínguez, J.J. 2021. Ensayo de penetración dinámica súper pesada (dpsh): equivalencia para el ensayo de penetración estándar (SPT) en Colombia. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo, vol. 21(2), 47-56. DOI: <https://doi.org/10.19053/1900771X.v21.n2.2021.14269>

Schmertmann, J.H. 1970. Static Cone to Compute Static Settlement over Sand. Proc. ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, vol. 96, No. SM-3, May.

Sowers, G.B. and Sowers G.F. 1993. Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Versión Española de la tercera edición en inglés, Editorial Limusa, México, D.F.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice" Second Edition, John Wiley and Sons, New York.

Roberto Lorenzo Rodríguez Pacheco
Científico Titular
Centro Nacional Instituto Geológico y Minero (IGME)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)