

GUÍA PARA LA REHABILITACIÓN DE HUECOS MINEROS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

ACTIVIDAD 2

SEPTIEMBRE 2016



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE



Instituto Geológico
y Minero de España

DIRECCIÓN GENERAL
DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL
Y MEDIO NATURAL

Este documento recoge parte de los trabajos realizados dentro de la ENCOMIENDA DE GESTIÓN ENCARGADA AL INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME) PARA LA REALIZACIÓN DE TRABAJOS TÉCNICOS SOBRE LA REHABILITACIÓN DE HUECOS MINEROS CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) A LA DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD Y EVALUACIÓN AMBIENTAL Y MEDIO NATURAL (2015-2017)

Se ha realizado para dar cumplimiento de la Actividad 2. Selección de la tipología de huecos en base a sus características geológicas, litológicas, geotécnicas, hidrogeológicas y ambientales.

Dirección del proyecto:

D. Antonio Cabrera Marianini y D^a Raquel Gómez Rodríguez. Subdirección General de Residuos. D. G. de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural.
D. Lucas Vadillo Fernández. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Autores:

María Esther Alberruche del Campo, Francisco Javier Fernández Naranjo, Julio César Arranz González, Virginia Rodríguez Gómez, Roberto Rodríguez Pacheco, María Ángeles Perucha Atienza y Lucas Vadillo Fernández.

ÍNDICE

	Pág.
1. TIPOLOGÍA Y SELECCIÓN DE HUECOS MINEROS PARA SU RESTAURACIÓN	
CON RCD.....	1
1.1. Tipología de huecos mineros de explotaciones a cielo abierto	1
1.2. Criterios de selección de huecos mineros para su rehabilitación con RCD.....	10
1.2.1. Evaluación preliminar de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD	12
1.2.1.1. <i>Condicionantes técnico-mineros (C_{MIN})</i>	15
1.2.1.2. <i>Coste de transporte y suministro con RCD (T_{SUM})</i>	26
1.2.1.3. <i>Prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST}).....</i>	29
1.2.1.4. <i>Índice de idoneidad del hueco minero para su rehabilitación con RCD (ID).....</i>	31
1.3. Conclusiones.....	32
2. BIBLIOGRAFÍA	36

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Izquierda: minería metálica. Corta Cerro Colorado (Minas de Riotinto, Huelva). Derecha: minería de carbón. Corta Gargallo (Andorra, Teruel) (ENDESA GENERACIÓN, SA)	1
Figura 2. Minería de transferencia y relleno final del hueco residual con yesos de desulfuración en la Corta Barrabasa (Andorra, Teruel) (ENDESA GENERACIÓN, SA).....	3
Figura 3. Izquierda: explotación de carbón por el método de descubierta (Romero, 2006). Derecha: explotación de carbón por el método de terrazas (Herrera Herbert, 2006).....	3
Figura 4. a) Método de explotación por minería de contorno. b) Explotación de carbón por minería de contorno en los Apalaches, en EEUU. (Foto de J. Henry Fair para NRDC; www.nrdc.org).....	3
Figura 5. Canteras de rocas industriales de: a) y b) calizas para áridos de machaqueo en Camargo (Cantabria) y Alhaurín de la Torre (Málaga); c) yesos en Pina de Ebro (Zaragoza) (Rubio Navas <i>et al.</i> , 2007); y d) arcillas en Teruel.....	5
Figura 6. Relleno y rehabilitación del hueco de una explotación de sepiolita mediante la transferencia de los estériles en Calatayud (Zaragoza).....	5
Figura 7. a) Cantera de mármol (Cehegín, Región de Murcia). b) Cantera de pizarra (SIEMCALSA, 2007).....	6
Figura 8. a) Escombrera de una explotación de mármol (Cehegín, Región de Murcia). b) Escombreras de una explotación de pizarra (La Cabrera, León).....	7
Figura 9. Huecos de graveras abandonadas en la Ribera Alta del Ebro (Navarra) (izquierda), y en Fuentes de Ebro (Zaragoza) (derecha).....	7
Figura 10. Conductividad hidráulicas (log K) para distintos tipos de rocas y sedimentos (Freeze & Cherry, 1979).....	16
Figura 11. Distintos grados de erosión en taludes de huecos mineros.....	23
Figura 12. Grietas verticales y desprendimientos en una gravera (izquierda). Grietas de tracción en cabecera de un talud de una explotación de arcillas (derecha).....	23
Figura 13. Taludes de huecos excavados en rocas duras con distinto grado de fracturación y alteración.....	24
Figura 14. Valoración simplificada de la idoneidad potencial de los huecos mineros según tipología para su rehabilitación con RCD.....	24

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Caracterización de tipologías de cortas, descubiertas, terrazas y minería de contorno (Sanz Contreras, 1992)	9
Tabla 2. Caracterización de tipologías de canteras (Sanz Contreras, 1992).....	9
Tabla 3. Caracterización de tipologías de graveras (Sanz Contreras, 1992).....	9
Tabla 4. Criterios para la exclusión de huecos mineros para su rehabilitación con RCD.....	13
Tabla 5. Escala de valoración de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD.....	14
Tabla 6. Recomendación de uso de RCD en rellenos mineros en función de las características geológicas y posición del nivel freático en la zona ocupada por la explotación minera (Flores Martínez <i>et al.</i> , 2010).....	18
Tabla 7. Criterios de valoración del factor hidrogeológico (AG_{SUB}).....	20
Tabla 8. Criterios de valoración del factor de proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP}).....	21
Tabla 9. Criterios de valoración del grado de erosión de los taludes del hueco y/o presencia de inestabilidades (ER_{EST}).....	25
Tabla 10. Criterios de valoración del factor coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})..	28
Tabla 11. Definición de las clases de accesibilidad visual (A_{VIS}).....	30
Tabla 12. Criterios de valoración del factor prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST}).....	30
Tabla 13. Índices definidos para la determinación de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD.....	32

1. TIPOLOGÍA Y SELECCIÓN DE HUECOS MINEROS PARA SU RESTAURACIÓN CON RCD

1.1. Tipología de huecos mineros de explotaciones a cielo abierto

La tipología de hueco minero depende del tipo de yacimiento mineral y del método de explotación a cielo abierto aplicado en la extracción de los recursos minerales. A continuación, se describen las principales características de los huecos generados según los distintos tipos de explotación (IGME, 2004):

- Cortas

Este tipo de laboreo es propio de yacimientos de minerales metálicos que profundizan en vertical. El laboreo se realiza mediante un diseño geométrico tridimensional, en forma de cono invertido. Un diseño parecido, aunque no exactamente con la misma forma cónica invertida, se da en yacimientos de carbón masivo, tipo lignitos pardos (Puentes de García Rodríguez o Meirama en Galicia). La extracción del mineral se realiza por banqueo descendente hasta llegar al fondo de corta, calculado en función de parámetros de rentabilidad (**Figura 1**). El hueco generado en las cortas de minería metálica suele ser muy profundo, pudiendo en algunos casos superar los 300 m como es el caso de “Corta Atalaya” (Minas de Riotinto, Huelva).



Figura 1. Izquierda: minería metálica. Corta Cerro Colorado (Minas de Riotinto, Huelva). Derecha: minería de carbón. Corta Gargallo (Andorra, Teruel) (ENDESA GENERACIÓN, SA)

En el caso de la minería metálica se generan importantes volúmenes de residuos mineros: estériles de descubierta o desmonte, estériles de corta, lodos de lavadero, etc. Sin embargo, la operatividad de la mina en bancos descendentes no permite el relleno del hueco generado a medida que avanza la explotación. El posterior relleno del mismo con los propios residuos mineros resulta por lo general inviable económicamente, tras el cese de la actividad. No obstante, existen algunos ejemplos de cortas con relleno parcial, e incluso total, con residuos mineros en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Rodríguez *et al.*, 2006); esto es posible en zonas mineras donde el yacimiento mineral se explota con el desarrollo de más de una corta, muy próximas entre sí.

- **Minería por Transferencia**

La minería por transferencia es propia de yacimientos estratiformes de carbón, generalmente, de varias capas horizontales o subhorizontales, con una corrida que puede ir de cientos de metros a algunos kilómetros. Este tipo de yacimientos minerales permite la transferencia del estéril a medida que avanza la extracción, previa apertura de un hueco inicial que debe tener la superficie necesaria para el movimiento de la maquinaria de extracción y carga, y que se rellena con el estéril de la fase siguiente, de acuerdo con el avance unidireccional de las capas de carbón. El resultado de este tipo de laboreo es: la formación de una escombrera con los estériles procedentes del hueco inicial, el relleno de la mayor parte del hueco minero y un hueco residual al final de la vida útil de la mina que resulta del balance de estériles (**Figura 2**). Dicho método de laboreo minero facilita además la rehabilitación progresiva de la zona afectada a medida que se va transfiriendo el estéril y el suelo vegetal (Herrera Herbert, 2006). Aunque existen ejemplos de minería por transferencia en algunas cortas de carbón (**Figura 2**), los dos sistemas clásicos representativos de este tipo de minería son:

- La explotación por descubiertas (sistema americano) que se suele aplicar en los casos en que el recubrimiento por estériles presenta potencias inferiores a 50 m. Consiste en una excavación unidireccional de un solo banco, a modo de trinchera, al que se denomina módulo. Una vez explotados los recursos de un módulo, se

procede a la excavación del siguiente que será paralelo y colindante con el anterior (**Figura 3**). Los estériles extraídos en cada módulo se depositan en el hueco creado por la excavación del módulo previo (Romero, 2006).

- La explotación por terrazas (sistema alemán) que se realiza en yacimientos con uno o varios niveles mineralizados con un recubrimiento de estériles muy potente. El método se basa en un banqueo con avance unidireccional. Las profundidades que se pueden alcanzar son importantes. No obstante, el método permite el depósito del estéril en los huecos creados con el avance de la explotación alrededor de ésta (**Figura 3**).



Figura 2. Minería de transferencia y relleno final del hueco residual con yesos de desulfuración en la Corta Barrabasa (Andorra, Teruel) (ENDESA GENERACIÓN, SA)



Figura 3. Izquierda: explotación de carbón por el método de descubierta (Romero, 2006). Derecha: explotación de carbón por el método de terrazas (Herrera Herbert, 2006)

La minería por transferencia también se ha aplicado a otros tipos de recursos mineros (sepiolita, níquel, gossan, etc.).

- Minería de contorno

La minería de contorno se aplica mayoritariamente a yacimientos de carbón (aunque también existen ejemplos en otros tipos de recursos), con capas horizontales de reducida potencia y topografía generalmente desfavorable. Consiste en la excavación del estéril y del mineral en sentido transversal al afloramiento dejando un talud de banco único, y progresión longitudinal siguiendo dicho afloramiento. Si la longitud de corrida es grande permitiendo un gran desarrollo superficial de la excavación, y teniendo en consideración la escasa profundidad de los huecos, es posible una transferencia de los estériles facilitando el relleno y rehabilitación de los mismos

Figura 4.

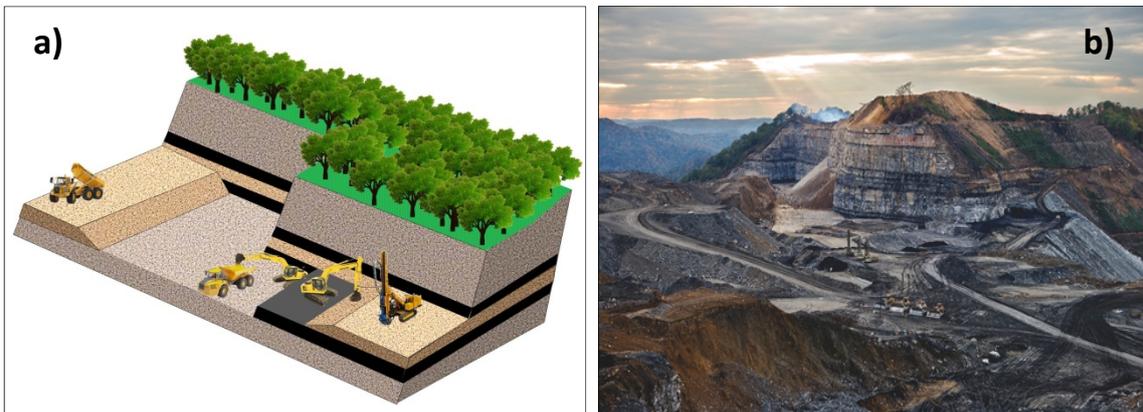


Figura 4. a) Método de explotación por minería de contorno. b) Explotación de carbón por minería de contorno en los Apalaches, en EEUU. (Foto de J. Henry Fair para NRDC; www.nrdc.org)

- Canteras

Se denominan canteras a las explotaciones de rocas industriales y ornamentales en las que el recurso mineral beneficiable es extraído de un macizo rocoso, generalmente competente. El método de explotación aplicado suele ser el de banqueo, con uno o varios niveles.

En las explotaciones de rocas industriales se extrae un todo-uno fragmentado, apto para alimentar a las plantas de tratamiento para la obtención de áridos u otros materiales de construcción (arcillas, yesos, etc.), la fabricación de cementos, productos industriales, etc., siendo común en las mismas la presencia de bancos de gran altura

sobre todo en antiguas canteras abandonadas. De entre todas ellas, destacan las explotaciones de áridos para machaqueo por ser las más abundantes y próximas a los núcleos urbanos. Herrera Herbert (2006) distingue diversas tipologías en este tipo de explotaciones: a) canteras en terrenos horizontales, que se inician en forma de trinchera hasta alcanzar la profundidad del primer nivel, ensanchándose a continuación el hueco creado; b) canteras en ladera con un banqueado con numerosos bancos de poca altura (tendencia actual), o bien, pocos bancos pero muy elevados; y c) superquarries (supercanteras). La extracción de áridos y otros materiales de construcción (yesos, arcillas, etc.) presentan un ratio de aprovechamiento alto (material útil/material estéril), por lo que la generación de residuos mineros es muy baja, lo que imposibilita el relleno de los huecos mineros (**Figura 5**). Dentro del sector de rocas industriales es posible encontrar algún ejemplo de minería de transferencia, aunque no suele ser muy común, como es el caso de la explotación de sepiolita en Calatayud (Zaragoza) (**Figura 6**).



Figura 5. Canteras de rocas industriales de: a) y b) calizas para áridos de machaqueo en Camargo (Cantabria) y Alhaurín de la Torre (Málaga); c) yesos en Pina de Ebro (Zaragoza) (Rubio Navas *et al.*, 2007); y d) arcillas en Teruel



Figura 6. Relleno y rehabilitación del hueco de una explotación de sepiolita mediante la transferencia de los estériles en Calatayud (Zaragoza).

En las explotaciones de rocas ornamentales se obtienen grandes bloques paralelepípedicos, que posteriormente son cortados y pulidos en placas de diferentes espesores según su uso (**Figura 7**). Estas explotaciones se caracterizan por la presencia de un gran número de bancos con planos de corte más o menos limpios dependiendo del método de corte empleado (hilo diamantado, rozadoras de brazo, etc.). Al igual que en el caso anterior, Herrera Herbert (2006) distingue diversos tipos: a) canteras en foso sobre terrenos llanos en las que la explotación se encuentra totalmente confinada por taludes verticales o subverticales; b) canteras en ladera sobre terrenos en pendiente; y c) canteras de nivelación en terrenos montañosos.



Figura 7. a) Cantera de mármol (Cehegín, Región de Murcia). b) Cantera de pizarra (SIEMCALSA, 2007)

En las explotaciones de roca ornamental es común encontrar escombreras que incluyen estériles procedentes del desmonte del terreno e incluso material de cantera desechado por la presencia de fracturas, rocas oxidadas e impurezas, etc., que imposibilitan su comercialización por no cumplir las calidades técnicas exigidas y otros rechazos del proceso de tratamiento (lodos, etc.) (**Figura 8**). En el caso de las escombreras de mármol, caliza marmórea y granito suele ser común una amplia variedad de tamaños de material con bloques centimétricos a métricos. Existen algunas experiencias de valorización de estos residuos como áridos mediante la instalación de plantas de machaqueo y trituración en la misma explotación (Vadillo y Rodríguez, 2012).



Figura 8. a) Escombrera de una explotación de mármol (Cehegín, Región de Murcia). b) Escombreras de una explotación de pizarra (La Cabrera, León)

- Graveras

Las graveras son explotaciones que benefician materiales detríticos no consolidados como arenas y gravas, para la producción de áridos naturales (**Figura 9**). En función de la afección o no al nivel freático, se pueden clasificar en: a) graveras secas, consistentes en excavaciones tridimensionales hasta alcanzar el fondo previsto o lecho del depósito de gravas y arenas por encima del nivel del río o el nivel freático. Según la profundidad de extracción pueden presentar un frente único o escalonado en varios bancos; b) graveras con explotación bajo lámina de agua, cuando el nivel freático se ve afectado, por lo que la extracción se realiza total o parcialmente bajo el agua, realizándose generalmente en un solo banco de altura igual a la de la profundidad del hueco inundado. En este caso, los terrenos afectados suelen ser restaurados como

lagunas, llegándose a rellenar parcialmente algunas zonas; y c) graveras con rebajamiento del nivel freático mediante la construcción de pozos, zanjas, etc.



Figura 9. Huecos de graveras abandonadas en la Ribera Alta del Ebro (Navarra) (izquierda), y en Fuentes de Ebro (Zaragoza) (derecha)

Con vistas a las posibilidades de rehabilitación de los huecos mineros, y a modo de síntesis, es posible distinguir las siguientes casuísticas: 1) grandes cortas mineras con escombreras y presas de lodos de lavadero en las proximidades, que suelen presentar huecos de gran volumen, extensos y profundos, cuya remodelación y relleno es por lo general inviable económicamente. 2) Explotaciones a cielo abierto que realizan una minería por transferencia o una minería de contorno que permiten el relleno de los huecos generados con los propios residuos mineros. En estos casos, puede quedar un pequeño hueco residual y una escombrera externa con los materiales del hueco inicial de excavación. 3) Canteras de rocas industriales y ornamentales que producen un elevado volumen de residuos mineros que son depositados en escombreras próximas. Y 4) explotaciones de rocas industriales que generan pocos volúmenes de residuos (alto ratio de aprovechamiento mineral/estéril) para el relleno de los huecos creados, como es el caso de las canteras de áridos de machaqueo y materiales de construcción, graveras de áridos naturales, etc., y que tienden a localizarse en las proximidades de los núcleos urbanos o centros de consumo.

La geometría del hueco de explotación va a determinar la capacidad o volumen de material necesarios para su remodelación, así como el diseño y planificación de las operaciones de relleno (Ihobe, 2015). Sanz Contreras (1992) estableció diversas tipologías de huecos mineros, para cada uno de los grandes métodos de explotación minera, en función de criterios geotécnicos y geométricos entre otros factores, con el

fin de caracterizar los impactos ambientales asociados a dichos métodos de explotación. Esta clasificación incluía una caracterización de los huecos excavados en la que se contemplaban diversos parámetros como: volumen, superficie y profundidad de los huecos, altura y talud de los bancos, así como otros aspectos (Tablas 1 a 3). Toda esta información pone de manifiesto la elevada diversidad casuística de huecos de explotación en minería a cielo abierto.

Tipología	Altura bancos m	Talud bancos (°)	Talud final (°)	Volumen hueco *10 ⁶ m ³	Profundidad hueco m	Superficie ha	Volumen residuos mineros m ³
Corta 1	≤ 10	20 - 30	25 - 30	< 0,01 – 2,5	< 50	1 - 5	≤ 25.000
Corta 2	≤ 10	30 - 45	35 - 45	2,5 - 10	50 - 100	5 - 10	25.000 – 100.000
Corta 3	> 10	45 - 60	50 - 60	10 - 20	100 - 200	10 - 15	100.000-500.000
Corta 4	> 10	60 - 90	70 - 90	> 20	> 200	> 15	≥ 500.000
Descubierta 1	≤ 10	20 - 30	20 - 30	< 0,01-0,2	20-25	1-2	≤10.000
Descubierta 2	≤ 10	30 - 45	30 - 45	<0,01-0,3	25-35	2-5	10.000-50.000
Descubierta 3	> 10	45 - 60	45 - 60	<0,01-0,45	25-40	5-8	25.000-100.000
Descubierta 4	> 10	60 - 90	60 - 90	<0,01-0,45	>40	> 8	≥100.000
Terraza 1	5-10	25-40	25-40	<0,01-1	<50	1-2	≤25.000
Terraza 2	5-15	25-40	25-40	1-3	50-100	2-4	25.000-100.000
Terraza 3	5-15	30-60	30-45	3-5	100-150	4-6	100.000-500.000
Terraza 4	5 - > 15	30-60	30-45	>5	> 150	>6	≥500.000
Contorno 1	≤ 10	20-35	20-30	≤0,01-1	20-25	1-2	≤10.000
Contorno 2	≤ 10	35-45	30-40	1-2	25-35	2-5	10.000-50.000
Contorno 3	10-30	45-60	40-50	2-3	25-40	5-8	25.000-100.000
Contorno 4	>30	45-60	40-50	>3	>40	>8	≥100.000

Tabla 1. Caracterización de tipologías de cortas, descubiertas, terrazas y minería de contorno (Sanz Contreras, 1992)

Tipología	Altura bancos m	Talud bancos (°)	Talud final (°)	Volumen hueco *10 ⁶ m ³	Altura frente m	Superficie ha
Cantera 1	5-15	28-90	28-45	≤0,01-0,5	<25	< 0,5
Cantera 2	5-15	35-90	30-60	0,5-1	25-50	0,5-1
Cantera 3	15-30	35-90	30-60	1-2,5	50-100	>1
Cantera 4	>30	35-90	30-60	>2,5	>100	>1

Tabla 2. Caracterización de tipologías de canteras (Sanz Contreras, 1992)

Tipología	Altura bancos m	Talud de bancos (°)	Talud final (°)	Volumen hueco *10 ⁶ m ³	Altura frente m	Superficie ha	PROFUNDIDAD NIVEL FREÁTICO m
Gravera 1	≤10	25-35	20-30	≤0,15	15	< 1	NO EXISTE - <10
Gravera 2	≤10	25-35	20-30	0,15-0,5	15	1-3	NO EXISTE - < 5
Gravera 3	>10	25-40	20-35	0,5-1	<20	3-5	NO EXISTE - <3
Gravera 4	>10	25-40	20-35	>1	>20	>5	NO EXISTE - <3

Tabla 3. Caracterización de tipologías de graveras (Sanz Contreras, 1992)

1.2. Criterios de selección de huecos mineros para su rehabilitación con RCD

La selección de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD debe realizarse teniendo en consideración criterios técnico-económicos, medioambientales y sociales conjuntamente (Josimovic & Maric, 2012). A continuación, a modo de introducción, y de manera generalista, se exponen algunos aspectos referidos al potencial uso de estos residuos en cada una de las grandes tipologías de explotación.

En la mayoría de las grandes cortas de minería metálica que presentan un hueco de gran volumen, salvo excepciones, es poco factible el relleno del mismo con RCD debido a criterios de viabilidad económico-técnica fundamentalmente. Entre los factores que contribuyen al fuerte encarecimiento del proyecto de relleno cabe citar: el control de la erosión y el alto volumen de agua de escorrentía con arrastre de sólidos procedentes del lavado de las bermas especialmente en climas húmedos, así como de agua procedente de fracturas, fallas o minados antiguos que inundan el hueco y que es necesario bombear desde el fondo de corta. La presencia de inestabilidades asociadas a procesos gravitacionales (deslizamientos, desprendimientos, cuñas, etc.) en los taludes, y que hay que eliminar o sanear por razones geotécnicas y de seguridad. El elevado coste económico del proceso de carga y transporte que representa la bajada y subida de camiones a través de pistas de largo recorrido, desde el nivel superior al fondo de corta. La formación de aguas ácidas en aquellas cortas de sulfuros polimetálicos sin presencia de carbonatos que neutralicen las mismas, entre otros factores. Por otra parte, la mayor parte de las cortas cerradas y/o abandonadas se

encuentran actualmente inundadas. No es de extrañar, por lo tanto, que la solución adoptada para la rehabilitación de este tipo de huecos haya sido en muchos casos la creación de lagos o zonas húmedas *versus* relleno con residuos mineros o de otro tipo. Asimismo, la posible existencia de reservas de mineral cuya explotación puede ser viable en función de un incremento coyuntural de precios, y su localización en zonas por lo general alejadas de los grandes centros de producción de RCD, condicionan y limitan el uso de estos residuos para el relleno del hueco de este tipo de explotaciones (Moreno Cayuela, 2000). No obstante, existe algún ejemplo de vertedero autorizado de RCD inertes en cortas de minería metálica como es el caso de la Corta Emilia, en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Rodríguez *et al.* 2006). Sin embargo, el R.D. 150/2008 que regula la producción y gestión de los RCD no considera este tipo de uso una operación de valorización o de restauración ambiental.

El uso de RCD en la remodelación de los huecos de cortas, descubiertas, terrazas o minería de contorno en explotaciones de carbón, que suelen ser menos profundos o de menor volumen, es por lo general más viable que en el caso anterior. Pueden presentar también, aunque en menor medida, problemas semejantes a los descritos en las cortas de minería metálica. De hecho, muchas cortas de carbón suelen acabar inundadas tras el cierre o el abandono de la explotación como es el caso de la cortas de Peñarroya (Córdoba). Por lo tanto, el posible uso de estos residuos para el relleno del hueco de excavación en este tipo de explotaciones dependerá del balance costo-beneficio en cada caso.

Las explotaciones de rocas industriales y ornamentales pueden presentar condiciones más o menos aptas para su rehabilitación con RCD, según los casos. De hecho, los RCD inertes representan en muchas ocasiones la única alternativa posible para la remodelación topográfica de los huecos residuales en aquellas explotaciones que generan pocos residuos mineros, especialmente en el sector de rocas industriales (áridos naturales y de machaqueo, arcillas, yesos, etc.). *A priori*, tal vez sean las explotaciones de arcillas para la industria ladrillera o la fabricación de tejas las que presenten el mayor potencial de uso de los RCD para restauración, por varias razones: a) la escasez de residuos mineros propios disponibles para el relleno de los huecos

excavados en este tipo de explotaciones, hace necesario el uso de material inerte externo. b) La naturaleza impermeable de las arcillas que actúan de barrera geológica frente a la infiltración de lixiviados que pudieran contaminar las aguas subterráneas, representa una mayor protección ambiental y supone una reducción significativa de los costes de impermeabilización y acondicionamiento del hueco. Y c) la amplia distribución geográfica de estas explotaciones en nuestro país, presentes en todas las grandes cuencas terciarias del Ebro, Duero, Tajo y Guadalquivir, así como en otras depresiones terciarias de menor entidad (Calatayud-Teruel, Guadalix-Baza, Alcoy, etc.). La mayoría de ellas están localizadas en las proximidades de núcleos urbanos, algunos de ellos con poblaciones importantes como es el caso de Toledo, Madrid o Sevilla entre otros muchos ejemplos (Sanfeliu y Cepriá, 2001). Esto implica un ahorro importante en los costes de transporte y garantiza la disponibilidad de material de relleno para llevar a cabo la rehabilitación minera con residuos de construcción y demolición, sobre todo en caso de proximidad a una gran ciudad o centro productor de RCD.

1.2.1. Evaluación preliminar de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD.

En esta Guía se propone una metodología de evaluación preliminar de la idoneidad de huecos mineros para su rehabilitación con RCD, basada en criterios de aptitud del mismo para dicho fin y capacidad de acogida del medio. De acuerdo con la misma, los huecos mineros más idóneos serán aquellos que: a) proporcionen la mayor protección ambiental por sus características intrínsecas (geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas, etc.). b) Se localicen además en medios poco vulnerables a la contaminación y poco expuestos a riesgos naturales que pudieran comprometer la integridad de la estructura. c) Se encuentren próximos a instalaciones de gestores de RCD y/o núcleos de población que puedan garantizar el suministro suficiente de material y reducir los costes de transporte. d) Y que la recuperación del espacio degradado se considere prioritaria, por contribuir de forma significativa a la mejora de la calidad ambiental y del paisaje o a la protección del patrimonio natural y cultural.

No obstante, en explotaciones generadoras de elevados volúmenes de residuos mineros debe priorizarse el uso de los mismos para el relleno de los huecos residuales, siempre que sea técnica y económicamente viable, tal y como se recoge en los objetivos del plan de gestión de residuos en el R.D. 975/2009. Por lo tanto, un primer criterio para la selección de un hueco de explotación para su relleno con RCD, sería: *la falta o escasez de residuos mineros propios o inviabilidad técnico-económica del uso de los mismos, para poder llevar a cabo la remodelación topográfica.*

CRITERIOS DE EXCLUSIÓN DE HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD
<ul style="list-style-type: none"> - Huecos mineros situados en zonas con evidencias¹ de un peligro significativo asociado a deslizamientos, movimientos en masa o caída de bloques, o localizados a una distancia ≤ 100 m de estas zonas inestables^a, así como evidencias de riesgos de subsidencia incluida la minera - Huecos mineros situados en calderas, conos y cráteres volcánicos activos, o inactivos si se encuentran catalogados de interés cultural protegido o en trámites de protección; y en zonas con evidencias¹ de un peligro significativo asociado a procesos de erupción (coladas de lava, etc.).^a - Huecos mineros situados en áreas kársticas con inestabilidades (asientos, colapsos, etc.), o con colonias estables de quirópteros o patrimonio catalogado de tipo cultural, histórico-artístico, turístico o deportivo que pudieran verse afectados, así como los localizados a una distancia ≤ 100 m de estas zonas kársticas inestables y/o con valor patrimonial natural o cultural.^a - Huecos mineros situados en zonas en las que exista un peligro significativo de aludes por acumulación estacional de nieve o en áreas que pudieran verse afectadas potencialmente.^a - Huecos mineros situados en zonas de Dominio Público Hidráulico definido en la Ley de Aguas (Capítulo I del Título 1 del RDL 1/2001), riberas y márgenes en sus zonas de servidumbre (5 m) y policía (100 m) (Capítulo II del Título 1 del RDL 1/2001), así como en el Dominio Público Marítimo Terrestre (Ley de Costas 22/1998, modificada por la Ley 2/2013).^a - Huecos mineros en los que la distancia vertical entre la cota mínima del fondo de excavación del vaso o de apoyo del sistema de impermeabilización artificial si fuera necesario su uso, respecto al nivel freático medio sea ≤ 2 m, o que el nivel freático pueda alcanzar dicha cota en un período húmedo.^a - Huecos mineros que pudieran localizarse en humedales RAMSAR, o incluidos en el Inventario Español de Zonas Húmedas u otros Inventarios de las CCAA^a, - Huecos mineros situados en la zona de inundación de periodo de retorno de 100 años^b - Huecos mineros próximos a embalses para abastecimiento situados aguas arriba, a menos de 500 m. - Huecos mineros que hayan sido catalogados e inventariados como Lugares de Interés Geológico (LIG), cuando el relleno represente su destrucción o la pérdida de valor patrimonial. - Huecos mineros declarados Bienes de Interés Cultural u otra figura de protección similar, y correspondiente perímetro de protección, o que el proyecto de relleno o restauración pueda representar una pérdida irreversible de patrimonio cultural catalogado o inventariado. - Huecos mineros que puedan afectar a una captación de agua (subterránea o superficial) para abastecimiento con un volumen medio diario igual o superior a 10 m^3 o que abastezca a más de 50 personas (núcleos urbanos, etc.), o al perímetro de protección de aguas minerales y termales aprobado por la legislación específica, situados a menos de 100 m aguas abajo, o en la dirección del flujo del agua subterránea si se conoce. Todos estos elementos expuestos deben estar incluidos en el registro de zonas protegidas de acuerdo con la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE).

¹ Cartográficas, históricas, mediciones o reconocimientos técnicos. Además, en el caso del riesgo volcánico, se consideran las evidencias de los procesos activos de los últimos 500 años.

^a Criterios restrictivos en el Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001

^b Criterios limitantes en el Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001

Tabla 4. Criterios para la exclusión de huecos mineros para su rehabilitación con RCD

La definición de criterios de exclusión permite asimismo identificar y eliminar del proceso de selección, los huecos mineros considerados no idóneos para su rehabilitación con RCD. Para ello, se han incluido muchos de los criterios restrictivos para la ubicación de vertederos de inertes propuestos en el Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001, además de otros orientados a la protección del patrimonio natural y cultural. Entre estos últimos, destaca la exclusión de zonas mineras catalogadas o inventariadas como Lugares de Interés Geológico, siempre y cuando los trabajos de rehabilitación y relleno del hueco impliquen la destrucción o la pérdida de valor patrimonial, o declaradas como Bienes de Interés Cultural. Todos estos criterios han quedado recogidos en la **Tabla 4**.

En la determinación de la idoneidad de los huecos mineros para el relleno con RCD, no excluidos por algunos de los criterios enunciados anteriormente, se consideran los principales condicionantes técnico-económicos que encarecen un proyecto de relleno para garantizar la protección de la población y el medio ambiente, la vulnerabilidad del medio ante el impacto que pudiera generar el uso de estos residuos y el carácter prioritario de la restauración ambiental, entre otros. El objetivo último es una selección, o en su caso la elaboración de una lista de prioridades, de carácter *preliminar* de los huecos mineros en función del grado de idoneidad de los mismos para su rehabilitación con RCD. Respecto a los factores evaluados, sólo se han tenido en cuenta los más relevantes, y no todos los que podrían contemplarse en análisis más detallados del emplazamiento y caracterización del hueco de excavación como los que se realizan en estudios de evaluación de impacto ambiental o planes de restauración. La idoneidad de un hueco para su restauración con RCD se valora mediante un índice de idoneidad (ID), en términos cualitativos: baja, media, alta y muy alta de acuerdo con la escala de valoración de la **Tabla 5**. Dicha escala es aplicada a todos los componentes que definen dicho índice: condicionantes técnico-mineros, coste del transporte y garantía de suministro de RCD, y prioridad de restauración de espacios degradados por minería que son descritos en los siguientes apartados.

ESCALA DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
VALORES DEL ÍNDICE DE IDONEIDAD (ID)	CLASE DE IDONEIDAD
≤ 1	BAJA
> 1 – 2	MEDIA
> 2 – 3	ALTA
> 3 – 4	MUY ALTA

Tabla 5. Escala de valoración de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD

1.2.1.1. *Condicionantes técnico-mineros (C_{MIN})*

Este componente engloba todos aquellos aspectos, ambientales u de otro tipo, que van a condicionar el diseño técnico-minero del proyecto de rehabilitación del hueco de excavación, relacionados fundamentalmente con: la protección de las aguas subterráneas y superficiales, o con la erosión e inestabilidad de los taludes de la zona excavada que pudieran afectar a la seguridad durante las operaciones de relleno o a la estabilidad geotécnica del mismo, tras la restauración.

a) Factor hidrogeológico (AG_{SUB})

La protección de las aguas subterráneas es uno de los aspectos que más condicionan la idoneidad de un hueco minero para su remodelación con RCD, y es considerada en prácticamente todas las metodologías desarrolladas para la localización de vertederos (Josimovic & Maric, 2012; etc.) o para el relleno de huecos de excavación. La probabilidad de afección de las aguas subterráneas es evaluada a través del factor hidrogeológico (AG_{SUB}) que considera: las características hidrogeológicas del hueco minero, la localización del nivel freático, la presencia y vulnerabilidad de masas de agua subterráneas que pudieran verse afectadas, y otros elementos expuestos (manantiales, fuentes, pozos, etc.).

Las *características hidrogeológicas del hueco de explotación* (H_{SUB}) hacen referencia al efecto barrera o impermeabilidad del terreno respecto a la infiltración de lixiviados

que pudieran ser generados por los residuos. A pesar de que los RCD y tierras de excavación utilizados en restauraciones mineras deben ser “inertes”, es posible que en algunos casos las concentraciones de sulfatos en los lixiviados superen los valores límites establecidos en la Orden AAA/661/2013 para este tipo de residuos, dependiendo del fondo geológico regional y materias primas minerales utilizadas en el sector de la construcción en la zona. La infiltración de estas aguas sulfatadas puede producir procesos de contaminación en los acuíferos afectados, salvo que el fondo hidroquímico natural de sus aguas presente elevadas concentraciones de sulfatos. La normativa que regula la eliminación de residuos en vertederos de inertes (R.D. 1481/2001), de aplicación en la remodelación de huecos mineros con RCD según el R.D. 975/2009, obliga en los mismos la existencia de una barrera geológica natural con un coeficiente de permeabilidad (K) menor o igual de 1×10^{-7} m/s, de 1 m de espesor mínimo, a fin de garantizar la protección de las aguas subterráneas y el suelo. Si se carece de dicha barrera natural, dicha normativa impone, salvo excepciones y previa autorización del órgano ambiental competente, tal y como se ha comentado en apartados anteriores, la construcción de una barrera artificial consistente en una capa mineral de no menos de 0,5 m de espesor a fin de garantizar la impermeabilidad del vaso. El criterio que ha venido a denominarse “*características hidrogeológicas del hueco minero*” es evaluado a través de la permeabilidad o conductividad hidráulica (K) de las litologías que conforman el mismo. Este parámetro tiene un carácter técnico-económico pues informa, no solo del grado de protección del medio geológico frente a la contaminación de los recursos hídricos subterráneos por lixiviados de los RCD, sino también de la necesidad, en el caso de materiales con permeabilidad por encima de 1×10^{-7} m/s, de barreras artificiales (capas de mineral, geotextiles, etc.) para poder alcanzar el nivel de impermeabilización que la normativa exige lo que implica un incremento significativo de los costes de acondicionamiento del hueco. Para la evaluación de este criterio, se ha tenido en consideración las conductividades hidráulicas (m/s) de distintos tipos de rocas y sedimentos (Freeze & Cherry, 1979), y que se muestran en la **Figura 10**. En la **Tabla 6** se recogen las valoraciones de este componente en función de la permeabilidad de las formaciones geológicas que conforman el hueco.

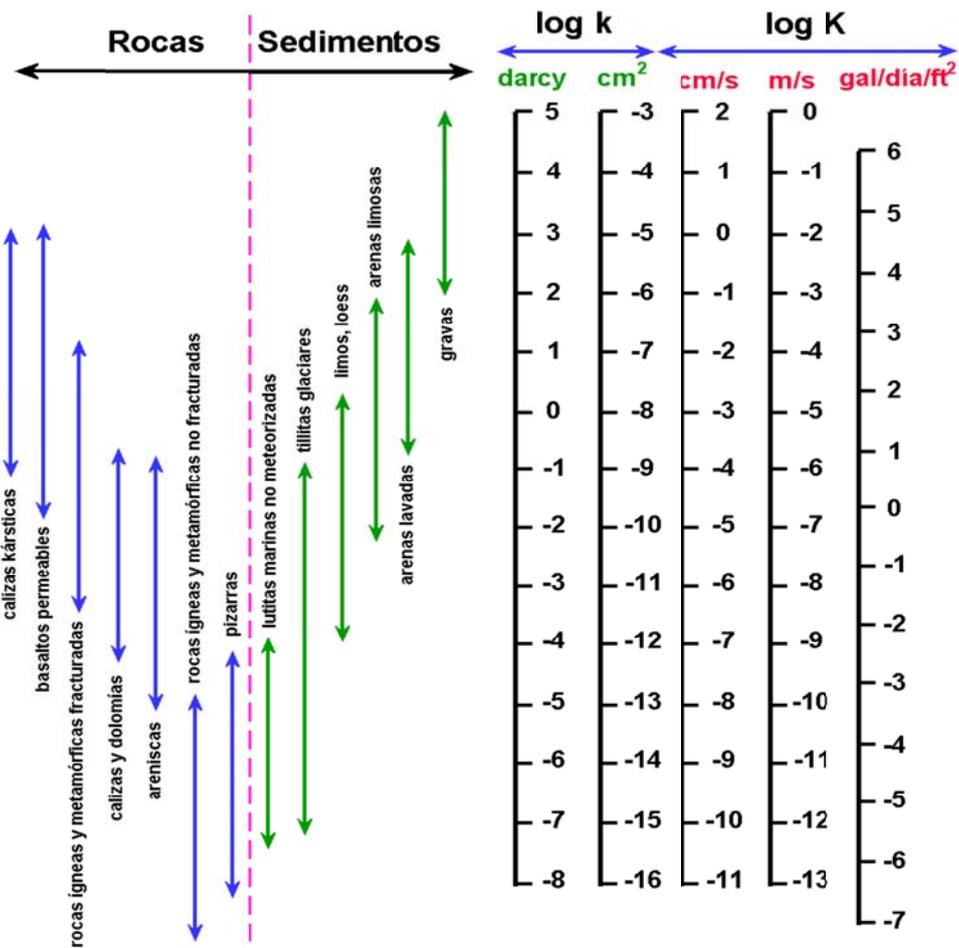


Figura 10. Conductividad hidráulicas ($\log K$) para distintos tipos de rocas y sedimentos (Freeze & Cherry, 1979)

Otro criterio que se considera es el de la *vulnerabilidad de las masas de agua subterránea* (V_{SUB}) que pudieran verse afectadas. La probabilidad de contaminación de los recursos hídricos subterráneos va a depender, en primer lugar, de que exista una masa de este tipo que pueda verse expuesta. Se parte de la base de que todo acuífero expuesto es vulnerable en mayor o menor grado (NCR, 1993). Por lo tanto, en caso de que se confirme su existencia, se evalúa su vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de tal forma que: a mayor vulnerabilidad menor es la protección natural y viceversa. Existe una gran variedad de métodos (matemáticos, de simulación o indexados) para evaluar la vulnerabilidad intrínseca (Jiménez Madrid, 2011). En esta fase de selección preliminar, pueden resultar de utilidad los métodos de índices y superposición cartográfica que permiten una evaluación de la misma rápida y barata, aunque con una mayor incertidumbre respecto a otros. De entre los métodos indexados que pueden aplicarse podemos destacar los siguientes: DRASTIC (Aller *et al.*,

1987), GOD (Foster, 1987), SINTACS (Civita *et al.*, 1990), AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1992), Ekv (Auge, 1995), BGR (BGR-LÄNDER, 1995), DRASTIC reducido (DGOHCA-IGME, 2002), o en el caso específico de acuíferos kársticos los métodos EPIC (Doerfliger & Zwahlen, 1997) y COP (Vías *et al.*, 2006), entre otros. Además, pueden utilizarse también algunas cartografías de vulnerabilidad de acuíferos y masas de agua subterráneas realizadas por algunas CCAA, o los *Mapas de Vulnerabilidad Intrínseca de las Masas de Agua Subterránea Intercomunitarias: Detríticas y Mixtas o Carbonatadas* realizados por la Dirección General del Agua (DGA) y el IGME. La valoración de este parámetro se muestra en la **Tabla 7**.

Se ha incluido también la *profundidad del nivel freático* (P_{NF}) como criterio de selección, a pesar de que muchos de los métodos para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos incluyen este factor. Tal y como se recoge en la **Tabla 4**, quedan excluidos de la selección los huecos de excavación en los que la profundidad media del nivel freático sea menor o igual a 2 m, o que éste pueda alcanzar dicha cota en un período húmedo o la capa de impermeabilización del relleno, de acuerdo con lo establecido por el Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001 para vertederos de inertes. Flores *et al.* (2010) establecen una clasificación de la aptitud del rechazo (tamaño zahorra < 30 mm) del proceso de reciclado de los RCD para la restauración minera según tipología: hormigón (tipo 1) y cerámico-mixto (tipo 2), en función de la litología del hueco receptor y la profundidad del nivel freático (**Tabla 6**). Estos especialistas proponen, en el caso de gravas y arenas limpias, muy permeables, el relleno con material de rechazo de hormigón cuando el nivel freático se localiza a más de 3 m de profundidad, y el cerámico-mixto a partir de más de 10 m. Consideran además que ambas tipologías de RCD son aptas para el relleno en litologías más o menos impermeables (arcillas, limos arcillosos, rocas masivas no karstificadas), cuando la profundidad del nivel freático es mayor de 0,5 m. Por el contrario, en calizas débilmente karstificadas y fisuradas sólo admiten ambos tipos de material cuando la capa freática se encuentra a más de 5 m de profundidad, y en calizas y yesos muy karstificados a más de 10 m. Asimismo, otros autores recogen como valor de referencia para la ubicación de vertederos, una profundidad del nivel freático superior a 3 m (Josimovic & Maric, 2012; García-Piñón *et al.*, 2008; Blanco, 2011).

PERFIL GEOLÓGICO	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO	TIPO DE RCD RECOMENDADA		
Gravas y arenas limpias	≤ 3m	--	--	--
	>3m y ≤ 10m	TIPO 1	--	--
	>10 m	TIPO 1	TIPO 2	
	Gravas secas <i>Sin nivel freático en las gravas. Se atenderá a las condiciones de las rocas subyacentes</i>	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Gravas y arenas con matriz limo-arcillosa	≤ 0,5m	--	--	--
	>0,5m y ≤ 3m	TIPO 1		
	>3m y ≤ 10m	TIPO 1	TIPO 2	
	>10 m	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Arcillas y limos arcillosos Rocas masivas no karstificadas (esquistos, pizarras, margas, calizas no karstificadas).	≤ 0,5m	--	--	--
	>0,5m y ≤ 3m	TIPO 1	TIPO 2	
	>3m	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Yesos masivos no karstificados	≤ 0,5m	--	--	--
	>0,5m	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
Calizas y yesos karstificados (con cavidades y huecos bien desarrollados, grietas abiertas)	≤ 10m	TIPO 1	--	--
	>10 m	TIPO 1	TIPO 2	--
Calizas débilmente karstificadas y fisuradas	≤ 1m	--	--	--
	>1m y ≤ 5m	TIPO 1	--	--
	>5 m	TIPO 1	TIPO 2	

Rechazos gestión RCD: Tipo 1. Hormigón; Tipo 2. Ladrillos, tejas y materiales cerámicos; Tipo 3. Aglomerados

Tabla 6. Recomendación de uso de RCD en rellenos mineros en función de las características geológicas y posición del nivel freático en la zona ocupada por la explotación minera (Flores Martínez et al., 2010).

En la **Tabla 7** se muestra la valoración adoptada para este criterio (P_{NF}). Se ha considerado la situación más óptima, desde el punto de vista de la protección de las aguas subterráneas, cuando el nivel freático se encuentra a más de 10 m de profundidad, o a más de 3 m en litologías totalmente impermeables.

Por último, para la determinación del factor hidrogeológico, se ha considerado además la *distancia a captaciones de agua para abastecimiento o consumo humano* (manantiales, pozos, etc.) (M_{SUB}) que proporcionen un volumen diario de agua de 10 o más metros cúbicos, o abastezcan a más de 50 personas (núcleos de población, etc.), así como las zonas o perímetros de protección de aguas minerales o termales aprobados por la legislación específica, incluidos en el Registro de Zonas Protegidas

según la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE). Teniendo en consideración algunas metodologías de evaluación de riesgos aplicada a suelos contaminados o residuos mineros (National Classification System for Contaminated Sites (CCME, 2008); PRA.MS (EEA, 2005); Alberruche *et al.*, 2014, etc.), se han excluido, tal y como se muestra en la **Tabla 7**, los huecos mineros con algunos de estos elementos expuestos a menos de 100 m aguas abajo, o en la dirección del flujo de agua subterránea si se conoce. Por otra parte, no existe un consenso en la bibliografía científico-técnica respecto a las distancias de protección entre vertederos o explotaciones restauradas con RCD y captaciones para abastecimiento de la población. No obstante, destacan como referencias las del Departamento de Protección Ambiental del estado de Maine (EEUU) que establece una distancia restrictiva respecto a manantiales de 1000 pies (305 m) (DEP, 2015), y que ha sido aplicada para vertederos de inertes en Dakota del Norte (EEUU)¹; el Departamento del Agua del Gobierno de Australia Occidental recomienda, sin embargo, una distancia de 100 m con vegetación en este tipo de depósitos con residuos inertes (Department of Water, 2015). En algunas metodologías para la localización de vertederos se establecen distancias de protección respecto a pozos para abastecimiento urbano de 500 m (Josimovic & Maric, 2012; Issa & Shehhi, 2012, etc.). Los criterios adoptados en esta Guía se muestran en la **Tabla 7**.

El **factor hidrogeológico (AG_{SUB})** es evaluado finalmente mediante la suma ponderada de los componentes: *características hidrogeológicas del hueco de explotación (H_{SUB})*; *vulnerabilidad de las masas de agua subterránea (V_{SUB})*; *profundidad del nivel freático (P_{NF})*; y *distancia a captaciones de agua para abastecimiento (M_{SUB})* de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$AG_{SUB} = 0,3 * H_{SUB} + 0,3 * V_{SUB} + 0,3 * P_{NF} + 0,1 * M_{SUB}$$

¹ <http://www.ndhealth.gov/wm/publications/Guideline16OperationOfInertWasteLandfills.pdf>. Consultado el 16 de marzo de 2016

CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
FACTOR HIDROGEOLÓGICO (AG_{SUB}) $AG_{SUB} = 0,3 * H_{SUB} + 0,3 * V_{SUB} + 0,3 * P_{NF} + 0,1 * M_{SUB}$	
Características hidrogeológicas del hueco de explotación	H_{SUB}
Calizas, dolomías y yesos muy karstificados con cavidades o huecos bien desarrollados.	Exclusión
Permeabilidad alta: arenas limpias, gravas	1
Permeabilidad moderada: calizas, dolomías y yesos débilmente kárstificados o fisurados; rocas ígneas y metamórficas fracturadas; arenas limosas.	2
Permeabilidad baja: areniscas, calizas, dolomías y yesos masivos; limos; limos arenosos; arcilla limosa.	3
Permeabilidad muy baja: arcillas y margas compactas; rocas ígneas y metamórficas masivas; pizarras; tillitas.	4
Vulnerabilidad de las masas de agua subterránea	V_{SUB}
Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación Alta o Muy Alta	1
Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación Media	2
Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación Baja	3
Vulnerabilidad Intrínseca a la contaminación Muy Baja	4
Profundidad del nivel freático	P_{NF}
≤ 2 m	Exclusión
> 2 – 3 m	1
> 3 – 5 m	2
> 5 – 10 m	3
> 10 m	4
> 3 m en litologías impermeables.	4
Sin nivel freático	4
Distancia a captaciones de agua para abastecimiento	M_{SUB}
< 100 m	Exclusión
100 – < 200 m	1
200 – < 500 m	2
500 – < 1.000 m	3
≥ 1.000 m	4

Tabla 7. Criterios de valoración del factor hidrogeológico (AG_{SUB})

b) Proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP})

Otro aspecto considerado es el factor de proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP}) que evalúa la posible afección de las mismas por efluentes y escorrentías procedentes de áreas mineras, restauradas con RCD. La distancia disminuye la probabilidad de que dichos efluentes puedan alcanzar cuerpos de agua superficial. Al mismo tiempo, favorece una reducción de la carga de sólidos en suspensión y contaminantes, en este caso sulfatos, por: infiltración, deposición, precipitación y otros

procesos de atenuación natural al interactuar con el terreno. Investigaciones sobre riesgos ambientales en minería abandonada postulan que la máxima afección sobre corrientes de agua superficiales se produce cuando éstas se localizan a menos de 30 o 50 m, aguas abajo, de una zona minera (Turner *et al.*, 2011; Shevenell *et al.*, 1997; Alberruche *et al.*, 2014) o un vertedero (Calvo, 2003; Garrido Vergara, 2008), y se reduce significativamente a partir de 500 m. Algunas normativas sobre vertederos de inertes en EEUU han establecido distancias de protección similares, de 30,5 m (100 pies) en el estado de Washington² o 61 m (200 pies) en Dakota del Norte¹. En esta Guía, se han excluido los huecos mineros situados a menos de 30 m de cursos de agua superficiales para su restauración con RCD. Por otra parte, diversos estudios y metodologías sobre ubicación de vertederos proponen una distancia superior a 500 m, para garantizar la protección de las aguas superficiales (EPA South Australia, 2007; Josimovic & Maric, 2012; Eskandari *et al.*, 2015, etc.). En la **Tabla 8**, se muestra la valoración de este factor.

CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
FACTOR DE PROXIMIDAD A MASAS DE AGUAS SUPERFICIALES (PA _{SUP})	
<i>Distancia del hueco a una masa de agua superficial</i>	PA _{SUP}
< 30 m	Exclusión
30 – 100 m	1
> 100 – 500 m	2
> 500 – 1.000 m	3
> 1.000 m	4

Tabla 8. Criterios de valoración del factor de proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP})

El riesgo de salinización por efluentes de RCD, con elevadas concentraciones de sulfatos, dependerá de la naturaleza hidroquímica y del caudal o capacidad de dilución de las masas de agua receptoras. La magnitud del impacto será menor en aguas sulfatadas y caudalosas. Sin embargo, estos factores no han sido contemplados en la metodología porque exigen un nivel de conocimiento que va más allá de un análisis de carácter preliminar, adoptándose un criterio conservador de máxima vulnerabilidad a todas las masas de agua superficiales expuestas.

² WAC 173-350-410, <http://apps.leg.wa.gov/wac/default.aspx?cite=173-350-400>

c) **Grado de erosión de los taludes del hueco y/o la presencia de inestabilidades (ER_{EST})**

El grado de erosión de los taludes del hueco y/o la presencia de inestabilidades (ER_{EST}) pueden incrementar significativamente los costes económicos derivados del acondicionamiento y saneado del mismo, para poder llevar a cabo las operaciones de relleno en condiciones de seguridad o garantizar la estabilidad geotécnica y la protección ambiental tras la restauración. Los criterios de valoración de este factor en suelos y rocas blandas, se han basado en la clasificación de estados erosivos de los taludes de depósitos de residuos mineros abandonados diseñada para la evaluación del riesgo de este tipo de instalaciones (Alberruche *et al.*, 2014), quedado expuestos en la **Tabla 9**. Algunos ejemplos de taludes de huecos mineros excavados en este tipo de materiales con distintos grados de erosión e inestabilidades se muestran en las **Figuras 11 y 12**, respectivamente.



Figura 11. Distintos grados de erosión en taludes de huecos mineros



Figura 12. Grietas verticales y desprendimientos en una gravera (izquierda). Grietas de tracción en cabecera de un talud de una explotación de arcillas (derecha)

Por el contrario, en taludes de huecos de excavación en rocas duras van a ser más significativos los problemas de inestabilidad asociados a las discontinuidades del macizo rocoso, frente a los derivados de la alteración o meteorización del mismo (**Figura 13**). En este tipo de taludes, al igual que en el caso anterior, se proponen criterios de valoración que pueden ser obtenidos directamente en el sitio mediante una simple inspección visual (**opción 1ª de la Tabla 9**). No obstante, es posible el uso de criterios basados en clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso de base empírica como: la clasificación RMR (Rock Mass Rating) desarrollada por Bieniawski (1973, 1979 y 1989), que considera diferentes aspectos como la resistencia de la roca matriz, las condiciones de diaclasado y su posición relativa respecto a la excavación y el efecto del agua (Ayala Carcedo y Andreu, 2006; González Vallejo *et al.*, 2006); o bien, la clasificación SMR (Slope Mass Rating) que es una adaptación de la clasificación de Bieniawski para taludes (Romana Ruiz, 1995). Sin embargo, el uso de este tipo de clasificaciones supone un conocimiento de campo mucho más exhaustivo y la realización de ensayos in situ. La valoración del factor ER_{EST} mediante algunos de estos índices quedan reflejados en la **Tabla 9 (opción 2ª)**. En cualquiera caso, la asignación de los valores ER_{EST} parte de la premisa de que un mayor grado de erosión o gravedad de los problemas de estabilidad detectados, implica por lo general la aplicación de técnicas más complejas y/o una mayor inversión económica en las labores de acondicionamiento de los huecos de excavación, lo que representa un valor de este factor desde el punto de vista de la idoneidad más bajo y viceversa.



Figura 13. Taludes de huecos excavados en rocas duras con distinto grado de fracturación y alteración

CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
GRADO DE EROSIÓN DE LOS TALUDES DEL HUECO Y/O PRESENCIA DE INESTABILIDADES (ER_{EST})	
Huecos excavados en suelos y rocas blandas	ER_{EST}
- Erosión hídrica extrema con abundantes regueros y cárcavas tanto grandes como pequeñas, frecuentes fenómenos de tubificación, y/o presencia de movimientos de masa (deslizamientos, etc.).	1
- Abundantes regueros con frecuentes cárcavas (alguna grande, de > 1 m de profundidad) y algunos fenómenos de tubificación. O presencia de grietas de tracción verticales y en cabecera significativos desde el punto de vista de la estabilidad del talud.	2
- Erosión con regueros frecuentes o abundantes con pocas cárcavas pequeñas (de 30 cm a 1 m de profundidad).	3
- Erosión laminar o erosión con pocos regueros (< 30 cm de profundidad).	4
Huecos excavados en rocas duras (opción 1ª)	ER_{EST}
- Roturas generalizadas del talud o afección a uno o varios bancos en macizos rocosos muy fracturados y alterados.	1
- Macizo rocoso moderadamente fracturado y alterado. Riesgo de algún pequeño desprendimiento.	2
- Macizo rocoso ligeramente fracturado y meteorizado. Riesgo de caída de algún bloque pequeño aislado.	3
- Macizo rocoso inalterado sin fracturación o muy poco fracturado	4
Huecos excavados en rocas duras (opción 2ª)	ER_{EST}
CLASIFICACIÓN RMR (Bieniawski, 1973; 1979; 1989)	
- Macizo rocoso de clase IV y V de calidad mala y muy mala (RMR \leq 40)	1
- Macizo rocoso de clase III de calidad media (RMR entre 41 y 60)	2
- Macizo rocoso de clase II de calidad buena (RMR entre 61 y 80)	3
- Macizo rocoso de clase I de calidad muy buena (RMR entre 81 y 100)	4
CLASIFICACIÓN SMR (Romana Ruiz, 1995)	
- Talud totalmente inestable o inestable (SMR \leq 40)	1
- Talud parcialmente estable (SMR entre 41 y 60)	2
- Talud estable (SMR entre 61 y 80)	3
- Talud totalmente estable (SMR entre 81 y 100)	4

Tabla 9. Criterios de valoración del grado de erosión de los taludes del hueco y/o presencia de inestabilidades (ER_{EST})

d) Evaluación de los condicionantes técnico-mineros (C_{MIN})

El componente condicionantes técnico-mineros (C_{MIN}) es evaluado finalmente mediante la agregación ponderada de todos los factores descritos anteriormente: factor hidrogeológico (AG_{SUB}), factor de proximidad a masas de aguas superficiales (PA_{SUP}) y grado de erosión de los taludes del hueco y/o presencia de inestabilidades (ER_{EST}), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$C_{MIN} = 0,7*AG_{SUB} + 0,2*PA_{SUP} + 0,1*ER_{EST}$$

Los huecos mineros que presentan los valores C_{MIN} más altos serán aquellos que se localicen en zonas menos vulnerables o que proporcionen la máxima protección sobre las aguas subterráneas y superficiales, faciliten las operaciones de relleno en condiciones de seguridad y garanticen la estabilidad geotécnica del mismo con el menor coste técnico y económico, y viceversa.

1.2.1.2. Coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})

Para la determinación de la idoneidad se ha contemplado el componente coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM}), cuya valoración va a depender de la distancia de los huecos mineros a los núcleos urbanos y del potencial de producción de RCD de los mismos.

a) Distancia a centros de producción de RCD (D_{NUC})

La *distancia a centros de producción de RCD (D_{NUC})*, es decir, a núcleos urbanos o a centros gestores autorizados, tiene por objeto evaluar la viabilidad de las restauraciones en función del coste del transporte. La naturaleza de este tipo de residuos de elevado volumen propicia que éste sea alto y condicione el uso de los mismos en la rehabilitación minera. En el primer Plan Nacional de Residuos de

Construcción 2001-2006³, se hace referencia al “principio de proximidad” como uno de los principales principios de gestión de los RCD. En dicho plan se recoge la previsión de una red de centros de transferencia en un radio de 25 km alrededor de los núcleos urbanos, y de 15 km en el caso de núcleos de población importantes. La “Guía técnica para el relleno de canteras con materiales naturales de excavación” (Ihobe, 2015), utiliza esta última distancia a centros urbanos, como criterio de selección, además de otros. Sin embargo, para muchos autores, la distancia considerada crítica para el transporte de RCD desde los centros de producción a los vertederos o instalaciones de gestión, o transferencia en su caso, es de 30 km (Moreno Cayuela, 2000; Ihobe, 2012; etc.). Esta distancia crítica ha quedado recogida también en diversos planes autonómicos sobre RCD como es el caso de la Comunidad Autónoma de Madrid, Castilla-La Mancha, Comunidad Foral de Navarra, etc. Se ha tomado también como referencia la explotación de un recurso mineral de bajo valor económico como es el caso de los áridos, que se encuentra muy condicionada por los elevados costes del transporte. En este caso, a partir de 40 km se considera que la extracción de áridos no es viable económicamente (ANEFA, 2008c; Casado, 2010), salvo excepciones. En cualquier caso, los costos por este concepto se elevan notablemente a partir de 50 km (SIEMCALSA, 2008; Mel *et al.*, 2004). Teniendo en cuenta que el precio del material de rechazo del proceso de reciclado de los RCD es mucho más barato que los áridos naturales, es posiblemente el coste del transporte el principal factor económico que va a condicionar el uso de estos residuos en la restauración minera. Es por ello, que en esta Guía, los huecos situados hasta un radio de 15 km de los centros productores de RCD sean considerados como los más idóneos de acuerdo con este concepto.

b) Tamaño de población de los núcleos urbanos (P_{NUC})

El *tamaño de población de los núcleos urbanos* (P_{NUC}) evalúa el potencial de producción de RCD de los mismos en función del número de habitantes, y por lo tanto, el potencial de disponibilidad de material para garantizar el relleno de los huecos mineros próximos. En 2013, la producción media española de RCD por habitante era de 0,27 t/hab/año (FERCD, 2015). En España, sólo 6 municipios tenían más de 500.000

³ <https://www.boe.es/boe/dias/2001/07/12/pdfs/A25305-25313.pdf>

habitantes: Málaga, Zaragoza, Sevilla, Valencia, Barcelona y Madrid. Y sólo estas dos últimas ciudades tenían una población de más de un millón de habitantes. Estas grandes urbes junto con sus áreas metropolitanas constituyen importantes centros generadores de RCD en nuestro país. En este estudio, se ha asignado a los núcleos de población de más de 100.000 habitantes el valor más alto respecto al potencial suministro de RCD para restauración minera (**Tabla 10**).

c) Evaluación del coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})

Finalmente, el factor **coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})** es evaluado integrando ambos componentes: *distancia a centros de producción de RCD (D_{NUC})* y *tamaño de población de los núcleos urbanos (P_{NUC})*, que son valorados de acuerdo con los criterios recogidos en la **Tabla 10**, según la siguiente ecuación:

$$CT_{SUM} = 0,7 * D_{NUC} + 0,3 * P_{NUC}$$

<i>CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD</i>	
FACTOR COSTE DE TRANSPORTE Y SUMINISTRO DE RCD (CT_{SUM})	
$CT_{SUM} = 0,7 * D_{NUC} + 0,3 * P_{NUC}$	
<i>Distancia a centros de producción de RCD</i>	D_{NUC}
> 50 km	1
> 30 – 50 km	2
> 15 – 30 km	3
≤ 15 km	4
<i>Tamaño de población de los núcleos urbanos</i>	P_{NUC}
< 10.000 habitantes	1
10.000 – 100.000 habitantes	2
>100.000 – 500.000	3
> 500.000	4

Tabla 10. Criterios de valoración del factor coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM})

1.2.1.3. *Prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST})*

Otro factor contemplado en la evaluación, es el de prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST}). La prioridad de rehabilitación va a depender de la sensibilidad de los espacios y/o ecosistemas afectados y grado de conservación, la calidad del paisaje y la incidencia visual de la alteración minera.

a) Calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje (C_{AMB})

La urgencia en la rehabilitación es expresada en primer lugar a través del componente *calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje (C_{AMB})*. Se considera que los espacios naturales más sensibles o ecosistemas de más alto valor, o de una elevada calidad visual del paisaje, son los más prioritarios para su restauración. En este caso, la rehabilitación de estos espacios contribuye a mejorar, conservar o proteger el patrimonio natural más valioso. El Desarrollo Técnico del R.D. 1481/2001 no excluye los vertederos de inertes en los espacios naturales protegidos, salvo que en la propia norma de declaración o en los planes de gestión de los mismos se prohíba expresamente, y siempre y cuando la evaluación de impacto ambiental sea favorable. La filosofía de este criterio es contraria a la que se suele aplicar en la ubicación de vertederos.

b) Accesibilidad visual (A_{VIS})

Para evaluar la incidencia visual de las zonas degradadas solo se ha considerado la *accesibilidad visual (A_{VIS})* o visibilidad del impacto paisajístico generado por la minería desde las zonas más frecuentadas por la población o con mayor potencial de observadores, es decir, núcleos urbanos y vías de comunicación (Alberruche *et al.*, 2015). No se ha considerado la fragilidad visual intrínseca o capacidad de absorción visual de las alteraciones mineras por el entorno, adoptando un criterio conservador de máxima fragilidad visual en todos los casos. La accesibilidad visual ha sido valorada en función del tamaño de población de los núcleos urbanos y/o vías de comunicación, según intensidades medias diarias de tráfico o el sistema jerárquico de la red de

carreteras, desde donde las zonas mineras son visibles. A mayor accesibilidad visual mayor prioridad de recuperación de un espacio degradado. Los criterios de valoración asignados son abiertos, pudiendo en algunos casos incluir en la evaluación nuevos elementos con alto potencial de observación (ferrocarril de cercanías de grandes ciudades con un elevado tránsito de viajeros, usos recreativos y de ocio con gran afluencia de visitantes, etc.). En la **Tabla 11** se recogen los criterios que definen las clases de accesibilidad visual.

CLASE	CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE LA CLASE DE ACCESIBILIDAD VISUAL (A_{VIS})
BAJA	No visible desde vías de comunicación o núcleos de población
MEDIA	Visible desde núcleos de población de < 5.000 habitantes. Visible desde carreteras de la red local y autonómica Visible desde vías con IMD < 5.000*
ALTA	Visible desde núcleos de población de entre 5.000 y 50.000 habitantes Visible desde carreteras de la Red de Interés General del Estado (RIGE) Visible desde vías con IMD entre 5.000 y 10.000 vehículos*
MUY ALTA	Visible desde núcleos de > 50.000 habitantes Visible desde autopistas y autovías (independientemente de la titularidad) Visible desde vías con IMD de más de 10.000 vehículos*

*Si se dispone de datos de estaciones de aforo de tráfico, primará este criterio respecto al de titularidad de la carretera.

Tabla 11. Definición de las clases de accesibilidad visual (A_{VIS})

c) Evaluación de la prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST})

El factor de prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST}) es valorado a partir de los componentes: *calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje* (C_{AMB}) y *accesibilidad visual* (A_{VIS}), evaluados ambos de acuerdo con los criterios recogidos en la **Tabla 12**, y aplicando la siguiente ecuación:

$$PR_{REST} = 0,6 * C_{AMB} + 0,4 * A_{VIS}$$

CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD	
FACTOR PRIORIDAD DE RESTAURACIÓN DE ESPACIOS DEGRADADOS POR MINERÍA (PR_{REST})	
$PR_{REST} = 0,5 * C_{AMB} + 0,5 * A_{VIS}$	
Calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje	C_{AMB}
Espacios muy degradados ambientalmente y calidad visual del paisaje baja o muy baja	1
Espacios moderadamente degradados y/o calidad visual del paisaje media	2
Ecosistemas bien conservados y/o calidad visual del paisaje alta	3
Áreas sensibles o espacios naturales protegidos y/o calidad visual del paisaje muy alta	4
Accesibilidad visual	A_{VIS}
Baja	1
Media	2
Alta	3
Muy Alta	4

Tabla 12. Criterios de valoración del factor prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST})

1.2.1.4. Índice de idoneidad del hueco para su rehabilitación con RCD (ID)

El índice de idoneidad (ID) será función de todos estos componentes descritos anteriormente: condicionantes técnico-mineros (C_{MIN}), coste de transporte y suministro de RCD (CT_{SUM}) y prioridad de restauración de espacios degradados por minería (PR_{REST}). La determinación del mismo se lleva a cabo aplicando la siguiente ecuación:

$$ID = 0,6 * C_{MIN} + 0,3 * CT_{SUM} + 0,1 * PR_{REST}$$

El índice de idoneidad se aplica sobre todos los huecos mineros considerados susceptibles de ser rehabilitados con RCD, y que no han sido previamente excluidos por la concurrencia de alguno de los criterios de exclusión definidos anteriormente. Este índice pone de manifiesto, por lo tanto, la aptitud del hueco minero para el relleno con este tipo residuos en función de la vulnerabilidad del medio, el esfuerzo técnico y el coste económico necesarios para garantizar la protección ambiental, la viabilidad del uso de estos materiales en función del coste de transporte y distancia a los centros productores de RCD, y la prioridad social de protección y mejora del patrimonio natural y paisajístico más valiosos.

Por último, y a modo de síntesis, en la **Tabla 13** se recogen todos los índices paramétricos que integran la metodología propuesta.

ÍNDICES DEFINIDOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA IDONEIDAD DE LOS HUECOS MINEROS PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD		
Código	Concepto	Expresión de cálculo
ID	Índice de idoneidad del hueco minero para su rehabilitación con RCD	$ID = 0,6 * C_{MIN} + 0,3 * CT_{SUM} + 0,1 * PR_{REST}$
C_{MIN}	Condicionantes técnico-mineros	$C_{MIN} = 0,7 * AG_{SUB} + 0,2 * PA_{SUP} + 0,1 * ER_{EST}$
CT_{SUM}	Coste de transporte y suministro de RCD	$CT_{SUM} = 0,7 * D_{NUC} + 0,3 * P_{NUC}$
PR_{REST}	Prioridad de restauración de espacios degradados por minería	$PR_{REST} = 0,6 * C_{AMB} + 0,4 * A_{VIS}$
AG_{SUB}	Factor hidrogeológico	$AG_{SUB} = 0,3 * H_{SUB} + 0,3 * V_{SUB} + 0,3 * P_{NF} + 0,1 * M_{SUB}$
H_{SUB}	Características hidrogeológicas del hueco de explotación	
V_{SUB}	Vulnerabilidad de las masas de agua subterráneas	
P_{NF}	Profundidad del nivel freático	
M_{SUB}	Distancia a captaciones de agua para abastecimiento o consumo humano	
PA_{SUP}	Proximidad a masas de agua superficiales	
ER_{EST}	Grado de erosión de los taludes del hueco y/o la presencia de inestabilidades	
D_{NUC}	Distancia a centros de producción de RCD	
P_{NUC}	Tamaño de población de los núcleos urbanos	
C_{AMB}	Calidad ambiental y/o calidad visual del paisaje	
A_{VIS}	Accesibilidad visual	

Tabla 13. Índices definidos para la determinación de la idoneidad de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD

1.3. Conclusiones

El grado de aptitud de un hueco minero para su rehabilitación con residuos de construcción y demolición es evaluado a través de un índice de idoneidad, de carácter multifactorial. Dicho índice se inscribe en el contexto de un análisis de carácter preliminar que tiene como objetivo: a) la selección de huecos mineros aptos para el relleno con RCD. b) Y la valoración y ordenación de los mismos según grados de idoneidad a fin de establecer prioridades de actuación en la recuperación de espacios degradados por minería con RCD.

La selección de los huecos mineros para su rehabilitación con RCD se realiza teniendo como principales criterios: 1) la imposibilidad del relleno de los huecos de excavación

con residuos mineros por falta o escasez de los mismos o por inviabilidad técnico-económica del uso de éstos. 2) Y la exclusión de aquellos huecos localizados en medios muy vulnerables en los que el uso de RCD puede generar un impacto grave e irreversible sobre el medio ambiente o sobre el patrimonio cultural, o estar expuestos a peligros naturales que puedan inducir o incrementar el riesgo ambiental que representan.

La determinación o valoración del grado de idoneidad o aptitud de los huecos mineros seleccionados respecto a la rehabilitación con RCD se realiza, tal y como se ha señalado anteriormente, aplicando un índice de idoneidad (ID) que contempla aspectos técnico-mineros, ambientales y de prioridad social. Esta evaluación permite clasificar y establecer un orden o jerarquización de los huecos de extracción existentes en un determinado ámbito territorial, según diferentes grados de aptitud. Los menos idóneos para su relleno con RCD ($ID \leq 1$) serán aquellos que presentan un mayor riesgo ambiental lo que implica una mayor inversión económica en tecnología para su eliminación, así como un elevado gasto en transporte por situarse lejos de áreas urbanas importantes, en zonas degradadas de escasa incidencia visual cuya restauración no se considere prioritaria. Mientras que los más idóneos ($ID > 3$), serán aquellos otros localizados en las proximidades de los principales centros productores de RCD donde el impacto ambiental pueda minimizarse con el mínimo coste técnico y económico, y cuya rehabilitación contribuya de forma significativa a la protección y mejora del patrimonio natural más valioso, incluyendo los paisajes de calidad con una alta incidencia visual. Todo ello, contribuye a una mejor integración de los RCD en los planes de recuperación de espacios mineros degradados.

Todas las tipologías de huecos mineros pueden ser o no ser susceptibles de rehabilitación con RCD, siendo siempre necesaria una evaluación de la aptitud de cada hueco de excavación caso por caso. Sin embargo, de una forma generalista y simplificadora, se ha asignado una idoneidad potencial a cada una de las principales tipologías de huecos mineros, tal y como se muestra en la **Figura 14**.

Las principales razones que justifican esta valoración han sido señaladas *grosso modo* en la introducción del **apartado 1.2**. No obstante, se puede concluir que son las canteras de rocas industriales y ornamentales destinadas al sector de la construcción, excavadas en macizos rocosos masivos impermeables o de baja permeabilidad, las más aptas para su rehabilitación con RCD, y en menor medida las graveras sobre terrazas fluviales altas. Entre los principales factores que contribuyen a ello, hay que destacar la proximidad de todas estas explotaciones a los núcleos urbanos, principales productores de este tipo de residuos, lo que supone una importante reducción de los costes de transporte. Y que en todas ellas, la afección a las aguas subterráneas es improbable por la baja permeabilidad de los materiales, o por la profundidad del nivel freático como es el caso de las graveras que explotan áridos naturales de terrazas antiguas.

Por el contrario, las canteras de rocas industriales y ornamentales situadas en macizos fisurados o karstificados con una permeabilidad media o alta, y las graveras que explotan áridos de aluviales y terrazas bajas presentan una idoneidad baja, debido a la elevada probabilidad de afección a masas de agua subterráneas vulnerables.

Las grandes cortas de minería metálica y carbón muestran también en general una aptitud baja, aunque en estos casos fundamentalmente por razones de viabilidad técnico-económica del proyecto de rehabilitación. El control de la erosión y la escorrentía, la aplicación de medidas para garantizar la estabilidad geotécnica y garantizar las condiciones de seguridad, así como los elevados costes de transporte o los problemas de inundación son algunos de los factores que contribuyen a encarecer el proyecto de relleno en esta tipología de huecos. Y por último, aunque pueden presentar una problemática similar a la descrita anteriormente, el menor tamaño de los huecos residuales de descubiertas, terrazas, minería de contorno o minicortas de carbón posibilita en mayor medida la restauración con RCD por lo que se les ha asignado también una idoneidad media.

IDONEIDAD POTENCIAL DE LOS HUECOS MINEROS SEGÚN TIPOLOGÍA PARA SU REHABILITACIÓN CON RCD						
TIPOLOGÍA DE HUECOS MINEROS			IDONEIDAD POTENCIAL			
			BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA
GRANDES CORTAS DE MINERÍA METÁLICA Y CARBÓN						
MINICORTAS DE CARBÓN						
MINERÍA POR TRANSFERENCIA: DESCUBIERTAS, TERRAZAS, ETC.						
MINERÍA DE CONTORNO						
CANTERAS	ROCAS ORNAMENTALES	EN MATERIALES IMPERMEABLES O DE PERMEABILIDAD BAJA: explotaciones de mármol, caliza, pizarra, granito, arenisca, etc., en macizos rocosos masivos o poco karstificados y/o fracturados.				
		EN MATERIALES DE PERMEABILIDAD MEDIA Y ALTA: explotaciones de mármol, calizas, pizarras, granitos, areniscas, etc., sobre macizos rocosos moderadamente fracturados o karstificados				
	ROCAS INDUSTRIALES	EN MATERIALES IMPERMEABLES O DE PERMEABILIDAD BAJA: explotaciones de arcillas, yesos, áridos de machaqueo en macizos rocosos masivos o poco karstificados y/o fracturados, etc.				
		EN MATERIALES DE PERMEABILIDAD MEDIA Y ALTA: explotaciones de áridos de machaqueo en macizos rocosos moderadamente karstificados y/o fracturados, etc.				
GRAVERAS	ÁRIDOS NATURALES (ROCAS INDUSTRIALES)	GRAVERAS EN TERRAZAS MEDIAS Y ALTAS				
		GRAVERAS EN ALUVIALES Y TERRAZAS BAJAS				

Figura 14. Valoración simplificada de la idoneidad potencial de los huecos mineros según tipología para su rehabilitación con RCD

2. BIBLIOGRAFÍA

Alberruche, E., Arranz, J.C. Rodríguez, R., Vadillo, L., Rodríguez, V., Fernández, F.J. 2014. Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural e IGME. 318 p.

Alberruche, M.E., Arranz, J.C., Rodríguez, V., Fernández, F.J., Rodríguez, R., Vadillo, L. 2015. Metodología para la evaluación del impacto paisajístico residual de una mina de carbón a cielo abierto en el Valle de Laciana (España). DYNA 82 (190), pp 60-69.

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. and Hackett, G. 1987. *DRASTIC a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting*. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK. EPA Report 600/2-87-035; 1-455

ANEFA. 2008c. Día de los árboles y los áridos. Conoce una cantera o una gravera. 3 de abril de 2008. Folleto. 4 p. <http://conocelosaridos.org/pdfs/folletoAyA.pdf>

Auge, M. 1995. Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental. UBA: 1-65. Buenos Aires.

Ayala Carcedo, F.J., Andreu, F.J. 2006. *Manual de Taludes*. Serie: Geotecnia. IGME. 456 p.

Bieniawski, Z. T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions, South African Inst. of Civil Engineers*. Vol. 15. Nº 12. pp 335-344.

Bieniawski, Z. T. 1979. The geomechanics classification in rock engineering application. *Proc. 4th International Conference on Rock Mechanics*. Montreaux. Balkema. vol. 2, pp 41-48.

Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley and Sons. Inc. 272 p.

Blanco Fernández, D. 2011. *Diseño de metodología para la ubicación de vertederos de construcción y demolición y para cuantificar los residuos a gestionar: aplicación a la provincia de Castellón*. Tesis Doctoral. Universitat Jaume I y Universidad Tecnológica Metropolitana del Estado de Chile. 522 pp.

BGR-LÄNDER. 1995. Concept for the determination of the protective effectiveness of the cover above the groundwater against pollution. Adhoc Working Group on Hydrogeology, Hannover. 28 p.

Calvo, F. 2003. *Metodología de diagnóstico y caracterización ambiental de vertederos de residuos urbanos para su control, cierre, sellado y reinserción al medio*. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil. Área de Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Granada.

Casado, L.M. 2010. Estudio de viabilidad económica del negocio de reciclaje de residuos de construcción y demolición en la Comunidad de Madrid y diseño de planta de reciclaje. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Carlos III de Madrid. 240 pp.

CCME. 2008. National Classification System for Contaminated Sites. Guidance Document. PN-1403. Canadian Council of Ministers of the Environment. Winnipeg. 15 p.

Civita M., Chiappone, A., Falco, M. Jarre, P. 1990. Preparazione della carta di vulnerabilità per la rilocalizzazione di un impianto Pozzi dell'acquedotto di Torino. *Proceedings First Conv. Naz. "Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi*. Morano sol Parnaro. Vol 2: 461-462.

DGOHCA-IGME. 2002. *Cartografía de vulnerabilidad de acuíferos subterráneos a la contaminación en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir*. Informe inédito. IGME. Madrid.

DEP (Department of Environmental Protection). 2015. Maine solid waste management rules: chapter 401. Landfill siting, design and operation. 85 p.

Department of Water. 2015. Landfilling with inert materials. Water quality protection note nº 24. Government of Western Australia. September 2015.

Doerfliger, N., Zwahlen, F. 1997. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: Gunay and Jonshon (eds), *Int. symp. on karst waters and environment impacts*. Antalya. Turkey, Balkema, 117-123.

EPA South Australia. 2007. EPA guidelines for environmental management of landfill facilities (municipal solid waste and commercial and industrial general waste). 94 p.

Eskandari, M., Homaei, H., Mahmoodi, Pazira, E., Van Genuchten, M. Th. 2015. Optimizing landfill site selection by using land classification maps. *Environmental Science and Pollution Research* (2015) 22:7754-7765. Springer. DOI 10.1007/s11356-015-4182-7

EEA (European Environment Agency). 2005. *Towards an EEA Europe-wide assessment of areas under risk for soil contamination. Volume III. PRA.MS: scoring model and algorithm*. Final version, April 2005. 84 pp.

http://www.eionet.europa.eu/software/prams/release1/PRAMS3_Methodology.pdf

FERCD (Federación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición). 2015. Informe de Producción y Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España, Periodo 2009-2013. Madrid, 15 de febrero de 2015. 50 p.

[http://www.rcdasociacion.es/images/documents/INFORME%20RCD%202015%20\(2\).pdf](http://www.rcdasociacion.es/images/documents/INFORME%20RCD%202015%20(2).pdf)

Flores Martínez, F., Alegría, A., Lamata, J., Mallada, M.J., Martínez, A., De Miguel, P., García, S.L. 2010. Rehabilitación de espacios mineros con rellenos procedentes de la gestión de RCDs. Presentación Power Point. *Jornada Técnica sobre Sostenibilidad y Minería en la Rioja*. Logroño, 22 de Junio de 2010.

http://www.larioja.org/territorio/es/minas/jornadas-estudios-publicaciones-tecnicas/jornada-tecnica-sostenibilidad-mineria-rioja.ficheros/651359-524900_2-Rehabilitacion-FERNANDO.pdf

Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden, W. and Van Waegeningh, H.G. (Eds.) *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. TNO Committee on hydrological research, 38: 69-86. The Hague

Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall. 604 p.

García-Piñón, F., Sanfeliu, T., Meseguer, S., Jordán, M.M. 2008. Comparativa de revestimientos de base en vertederos en España y Chile. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Castellón, 23-24 de julio de 2008. REDISA´2008. 10 p.

Garrido Vergara, M.E. 2008. Metodología de diagnóstico ambiental de vertederos, adaptación para su informatización utilizando técnicas difusas y su aplicación en vertederos de Andalucía. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil. Área de Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Granada. 523 p.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. 2006. *Ingeniería Geológica*. Pearson. Prentice Hall. 715 pp

Herrera Herbert, J. 2006. *Métodos de minería a cielo abierto*. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. Ingenieros de Minas. 119 p.

http://oa.upm.es/10675/1/20111122_METODOS_MINERIA_A_CIELO_ABIERTO.pdf

IHOVE. 2012. Manual IHOVE para redacción e implantación del plan de gestión de residuos de construcción y demolición y buenas prácticas gremiales. Departamento de

medio ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Gobierno Vasco. Octubre 2012. 142 p.

IHOVE. 2015. *Guía Técnica para el Relleno de Canteras con Materiales Naturales de Excavación*. (Ley I/2005 para prevención y corrección de la contaminación). Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 324 p.

IGME. 2004. *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería* (nueva edición). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Guías y Manuales, nº 2. 359 p.

Issa, S.M. Shehhi, B. Al. 2012. A Gis-based multi-criteria evaluation system for selection of landfill sites: a case study from Abu Dhabi, United Arab Emirates. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B2, 2012. XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia. pp 133-138.

Jiménez Madrid, A. 2011. *Estudio metodológico para el establecimiento de zonas de salvaguarda de masas de agua subterránea en acuíferos carbonatados utilizadas para consumo humano. Aplicación de la Directiva Marco del Agua*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Tesis Doctorales nº 20.

Josimovic, B. Maric, I. 2012. Methodology for the regional landfill site selection. Sime Curkovic (ed). *Sustainable Development – Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management*. Chapter 22. pp 513-538.

Mel, J., Del Caño, A., De la Cruz, M.P. 2014. Sostenibilidad en la producción de árido granítico en el noroeste de España: consumo energético y emisiones de CO₂. 18th International Congress on Project Management and Engineering. Alcañiz. 16-18th July 2014. pp 486-497.

Moreno Cayuela, F. 2000. Vertederos de Residuos Inertes. En: Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía (Ed). *Técnicas de prevención en la generación de suelos contaminados: La gestión de los residuos peligrosos*. Tomo I. Capítulo 13. pp 535-565.

NCR (National Research Council), 1993. *Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty*. National Academies Press. 204 pp.

Rodríguez, R., García, C., Manteca, J.I. 2006. *Cartografía Temática e Inventario en Zonas Mineras*. En Roberto Rodríguez y Ángel García Cortés (Eds.). Los Residuos Minero-Metalúrgicos en el Medio Ambiente. IGME. Madrid. 27-66 pp

Romana, M. 1995. The geomechanical classification SMR for slope correction. *Proc. Int. Congress on Rock Mechanics*, 3 : 1085-1092.

Romero, E. 2006. Residuos de Construcción y Demolición. Máster de Ingeniería Ambiental 2006-2007. Universidad de Huelva. 25 p

www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos%20Construccion.pdf

Rubio Navas, J., Baltuille Martín, J.M., Alberruche del Campo, E., Bel-lan Ballester, A., Corral Lledó, M.M., Marchán Sanz, C., Pérez Cerdán, F. 2007. *Libro Blanco de la Minería de Aragón*. Departamento de Industria, Comercio y Turismo. Dirección General de Energías y Minas. Servicio de Ordenación Minera (Gobierno de Aragón) e IGME. 581 p.

Sanfeliu, T., Cepriá, J.J. 2001. Arcillas de uso cerámico. *XVI Reunión Científica de la Sociedad Española de Arcillas*. Curso de materias primas y métodos de producción de materiales cerámicos. Sociedad Española de Arcillas, Universidad Internacional de Andalucía, CSIC, Universidad de Jaén. Baeza (Jaén) del 22 al 26 de Octubre de 2001. pp 4-20.

Sanz Contreras, J.L. 1992. Desarrollo de un modelo integral de evaluación de los impactos ambientales producidos en las explotaciones mineras de superficie. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. ingenieros de Minas. 379 pp.

Shevenell, L.A., Henry, C.D. and Christensen, L. 1997. A ranking scheme developed to assess the relative potential of abandoned mine sites in Nevada to result in surface water and ground water degradation. Nevada Bureau of Mines and Geology Open-File report 97-3. 49 p.

SIEMCALSA. 2007. *Proyecto y análisis comparativo entre explotaciones de pizarra a cielo abierto y subterránea*. Junta de Castilla y León. 71 p.

SIEMCALSA. 2008. *Los áridos en Castilla y León*. Junta de Castilla y León. 22 p.

Turner, A.J.M., Braungardt Ch. and Potter, H. 2011. Risk-Based Prioritisation of Closed Mine Waste Facilities Using GIS. In: Rüde, Freund and Wolkersdorfer (Eds.). *Proceedings from the IMWA 2011: Mine Water-Managing the Challenges*. Aachen Germany, pp. 667-672.

Vadillo, L., Rodríguez, V. 2012. *Manual de gestión de residuos de industrias extractivas*. IGME – Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 75 pp. Inédito. (Centro de Documentación IGME)

Van Stempwoort, D. Ewert, L., and Wassenaar, L. 1992. *AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada*. PPWD pilot project, Sept. 1991 – March 1992. Groundwater and Contaminants Project., Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute.

Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I., Jiménez, P. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability zapping in carbonat (karstic) aquifers: The COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal* 14:912-925.