

(Editores)
Rodrigo Álvarez García
Almudena Ordóñez Alonso

RECURSOS MINERALES Y MEDIOAMBIENTE: UNA HERENCIA QUE GESTIONAR Y UN FUTURO QUE CONSTRUIR

LIBRO JUBILAR
DEL PROFESOR
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

2020

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

HOMENAJES

Rodrigo Álvarez García
Almudena Ordóñez Alonso
(editores)

*Recursos minerales y
medioambiente: una herencia
que gestionar y un futuro
que construir*

LIBRO JUBILAR
DEL PROFESOR
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

2020



Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.



Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciador:

Álvarez García, Rodrigo; Ordoñez Alonso, Almudena (editores). (2020). *Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir. Libro jubilar del profesor Jorge Loredo*. Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.



No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2020 Universidad de Oviedo

© Los autores

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.

Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.

Consulte las condiciones de la licencia en: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>



Esta Editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo

Edificio de Servicios - Campus de Humanidades

33011 Oviedo - Asturias

985 10 95 03 / 985 10 59 56

servipub@uniovi.es

www.publicaciones.uniovi.es

ISBN: 978-84-17445-95-9

DL AS 1451-2020



Jorge Loredo Pérez

Índice

PRÓLOGO	13
<i>Santiago García Granda, Rector de la Universidad de Oviedo</i>	

SEMBLANZA PERSONAL

Bosquejo a vuelapluma de Jorge Loredo Pérez, alumno, colega, colaborador y, sobre todo, amigo entrañable	17
<i>J. García-Iglesias.</i>	
Jorge Loredo: un compañero de viaje y un maestro de vida.....	21
<i>N. Roqueñí.</i>	
Casi un cuarto de siglo trabajando con Jorge: una experiencia de vida.	25
<i>A. Ordóñez.</i>	
Jorge Loredo: un gran hombre, un gran científico, un gran maestro y, ante todo, una gran persona.....	29
<i>M. I. Rucandío.</i>	

ARTÍCULOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

¿Se está gestando una nueva crisis del petróleo?.....	33
<i>I. Álvarez.</i>	
Mineralogía, textura y geoquímica de depósitos minerales y residuos mineros: una herramienta de interés en estudios de contaminación de suelos.....	45
<i>R. Álvarez, J. Álvarez-Quintana y A. Ordóñez</i>	
Drenaje ácido de minas en la Faja Pirítica Ibérica: Geoquímica, tratamiento pasivo y sus residuos en una economía circular	59
<i>C. Ayora, S. Orden, F. Macías y J. M. Nieto</i>	

Mineralogía magnética aplicada al estudio de los yacimientos; repaso sobre el magnetismo de los minerales y ejemplos de aplicación: el metasomatismo ferrífero de la dolomía encajante de las mineralizaciones Zn-Pb-Ba de La Florida e historia de los «gossans» de la Faja Pirítica Ibérica.....	71
<i>L. Barbanson y M. Essalbi</i>	
Nuevo método de cálculo de recursos y reservas minerales para cuerpos minerales de forma tabular – Aplicación al proyecto Carlés	83
<i>C. Castañón, A. Martín-Izard, I. Diego y D. Arias</i>	
Determinación de niveles de fondo y referencia de elementos traza en suelos: un enfoque metodológico avanzado	93
<i>E. Chacón, A. Callaba, P. Fernández-Canteli, F. Barrio-Parra, M. Izquierdo-Díaz y E. de Miguel</i>	
Historia de las aguas minerales y termales	105
<i>M. M. Corral, M. E. Galindo, J. Á. Díaz, C. Ontiveros y J. M. Fernández.</i>	
Mobility of Thallium and other trace elements in mine drainage waters from two carbonate-hosted Lead-Zinc ore deposits in the northeastern Italian Alps	115
<i>S. Covelli, E. Pavoni, N. Barago, F. Floreani, E. Petranich, M. Crosera, G. Adami & D. Lenaz</i>	
Comentarios heterodoxos sobre el cambio climático	129
<i>J. R. Fernández</i>	
The INCHaPA project: methodology for the study of historic quarries associated with the architectural heritage.....	141
<i>J. Fernández, E. Álvarez, J. M. Baltuille & J. Martínez</i>	
Metodologías de fraccionamiento secuencial como herramienta útil para la evaluación de la movilidad de mercurio y arsénico y su impacto en la cuenca minera de Asturias	153
<i>R. Fernández-Martínez, A. Ordóñez, R. Álvarez e I. Rucandio</i>	
Recursos geotérmicos en Asturias	167
<i>C. García de la Noceda</i>	
Análisis de la presencia de mercurio en diferentes compartimentos ambientales del estuario del río Nalón como consecuencia de la minería..	179
<i>E. García-Ordiales, N. Roqueñí, P. Cienfuegos, S. Covelli y L. Sanz-Prada</i>	
Contribución al conocimiento de la geología económica en la cuenca del río Esva.....	193
<i>S. González-Nistal, R. Álvarez y F. Ruíz</i>	

Escombreras asociadas a minería de sulfuros: pasivo ambiental y potencial activo económico desde una perspectiva de minería circular	205
<i>J. A. Grande, J. M. Dávila, J. C. Fortes, M. Santisteban, A. M. Sarmiento, F. Córdoba, M. Leiva, M. L. de la Torre, A. Jiménez, J. Díaz-Curiel, B. Biosca, A. T. Luís, N. Durães, E. A. Ferreira da Silva, M. J. Rivera, J. Aroba, B. Carro, J. Borrego y J. A. Morales.</i>	
Mercurio en Almadén – datos recientes (2000-2020) sobre su presencia en el medioambiente y sus implicaciones.....	219
<i>P. L. Higuera, J. M. Esbrí, E. García-Ordiales y J. D. Peco</i>	
Evaluación medioambiental temprana de riesgos a la salud, a la seguridad y al propio medioambiente por proyectos geo-energéticos	245
<i>A. Hurtado y S. Eguilior</i>	
European dimension of the social license to operate in mining.....	257
<i>K. Komnitsas</i>	
El cambio climático, las tecnologías limpias y la minería	265
<i>J. F. Llamas</i>	
Las aguas subterráneas y los acuíferos: su carácter estratégico en escasez y periodos de sequía.....	277
<i>J. Antonio López-Geta</i>	
Comportamiento del agua de mina en instalaciones geotérmicas: Análisis de un caso particular	297
<i>C. Loredó</i>	
Una tecnología para reducir las emisiones: el almacenamiento geológico de CO ₂	309
<i>R. Martínez Orío y P. Fernández-Canteli</i>	
Perspectivas sobre reducción de emisiones de mercurio originadas en la producción de energía	321
<i>M. R. Martínez Tarazona, M. A. López Antón y R. García</i>	
Almacenamiento de energía térmica y eléctrica en minas subterráneas cerradas: situación actual y balances de energía	333
<i>J. Menéndez</i>	
Contribución del yacimiento de Carlés a la mineralogía española	345
<i>M. Mesa</i>	
La descarbonización de las industrias minerales en el Principado de Asturias	357
<i>A. Olay</i>	

Notas sobre liderazgo	367
<i>J. C. Rodríguez-Ovejero</i>	
Viabilidad económica ambiental para la recuperación o reducción del consumo de agua de plantas de procesamiento de oro	377
<i>J. Soto, J. Melendez y P. Cienfuegos</i>	
La explotación minera del karst fósil en la sierra del Aramo: del Calcolítico al siglo xx	391
<i>M. Suárez</i>	

EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL TEMPRANA DE RIESGOS A LA SALUD, A LA SEGURIDAD Y AL PROPIO MEDIOAMBIENTE POR PROYECTOS GEO-ENERGÉTICOS

Antonio Hurtado y Sonsoles Eguilior

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT),
Madrid, España

RESUMEN

El desarrollo de proyectos de ingeniería que involucran sistemas geológicos (o geo-proyectos) es una tarea con retos importantes. Muchas veces el subsuelo está poco investigado, los recursos se evalúan de manera inadecuada y los proyectos a menudo se abandonan en las primeras etapas de la exploración debido al control deficiente de los componentes de riesgo relacionados con la incertidumbre asociada a la viabilidad técnica y económica de su implementación futura, así como a los impactos sociales o ambientales. Comprender y evaluar los riesgos medioambientales en estos geo-proyectos es una tarea con retos importantes. Las fases iniciales requieren de investigaciones específicas para el desarrollo de metodologías globales que permitan aplicar un punto de vista sistémico y herramientas que permitan la integración del conocimiento y el tratamiento de las incertidumbres.

Estos desarrollos tienen aplicación, entre otras, en el Almacenamiento Geológico de CO₂ (AGC) (Chadwick *et al.*, 2008), tecnología de mitigación del cambio climático, y en la extracción de gas no convencional o la geotermia de alta entalpía (AEA, 2012), fuentes energéticas con un menor impacto en dicho cambio climático. Estos campos participan, entre ellos y con otros, de similitudes formales que permiten compartir modelos conceptuales que facilitan el desarrollo del conocimiento para alcanzar una mejor percepción y tratamiento de los riesgos en fases tempranas.

Los objetivos y la orientación estratégica de estos desarrollos están alineados con el reto de alcanzar un futuro energético sostenible, es decir, medioambiental, social y económicamente aceptable. Existe una clara relación entre la estimación temprana de los riesgos medioambientales y la aceptación social de las tecnologías, pues se busca la garantía razonable de que la so-

ciudad se pueda beneficiar del uso de estas tecnologías evitando los efectos secundarios negativos. Esto permite contrarrestar tanto la desconfianza como los conceptos erróneos que los ciudadanos pudieran albergar con respecto a las mismas.

1. INTRODUCCIÓN

Existe un amplio consenso sobre la definición de «riesgo», a nivel internacional, entre las distintas directrices y guías (ISO, 2009). Una definición típica en el ámbito de la gestión de proyectos de ingeniería es aquella que califica al Riesgo como cualquier acontecimiento incierto o condición tal que, de producirse, tiene un efecto —positivo o negativo— en un objetivo del proyecto (PMI, 2000). La redacción exacta de las distintas definiciones puede variar, pero todas coinciden en la definición a partir de dos componentes. La primera se refiere a un término que hace referencia a la «incertidumbre», ya que riesgo es algo no materializado, que podrá o no ocurrir. El segundo se refiere a lo que sucedería si dicho riesgo se llegara a materializar, es decir, su impacto o consecuencias, ya que los riesgos se definen siempre en términos de su efecto sobre los objetivos de un proyecto.

El concepto de riesgo es intrínseco a la mayoría de las actividades humanas y los proyectos relacionados con aspectos energéticos que involucran al medio geológico no están exentos de ellos. Comparten un nivel de riesgo similar a cualquier otro tipo de actividad industrial y, particularmente, con los relacionados con la industria petrolífera y gasista. Por un lado, comparten riesgos asociados a la parte tecnológica de los desarrollos, como son los aspectos relacionados con los pozos y sus probabilidades de fallo y otros posibles efectos sobre el medio natural como son el uso del agua, del terreno, efectos del tráfico motorizado, el ruido, la contaminación lumínica, etc., que son aspectos generales de evaluación de riesgos de cualquier proyecto de ingeniería, con una amplia y probada experiencia de gestión.

Pero, además, en ellos se dan una serie de riesgos asociados a la perturbación de un medio natural, incluyendo el geológico, como pueden ser los sísmicos o los relacionados con el transporte a través del medio de los posibles contaminantes, tanto los introducidos como los ya presentes de manera natural en las formaciones geológicas. Estos contaminantes pueden generar riesgos debidos a emisiones de compuestos no deseados en distintos compartimentos ambientales, como la atmósfera o las aguas, superficiales o subterráneas. La importancia de cada riesgo específico, función de su probabilidad y consecuencias, dependerá principalmente de las características del emplazamiento, y de las opciones tecnológicas aplicadas.

Es evidente la necesidad de aportar respuestas adecuadas a estas cuestiones, y, preferiblemente desde el principio, entre otras razones, por el hecho de su influencia en la aceptación social, elemento clave en su implementación, especialmente en el caso de nuevas tecnologías.

Las herramientas de Gestión del Riesgo (G. R.) permiten afrontar el conocimiento y control de los mismos en una amplia variedad de actividades humanas, industriales o no. Así, la G. R. permite estructurar el esfuerzo de una organización para identificar, medir, clasificar y asumir, eliminar, mitigar, transferir, o controlar los distintos niveles de riesgos asociados a un proyecto. La

Fig. 1 muestra una posible estructura de un proceso de G. R. Las distintas fases son generales para todos los sistemas de gestión, aunque su encuadre puede variar entre metodologías.

Dentro de la G. R. se incluye la evaluación de riesgos como una de las etapas clave, mediante la cual se debe estimar tanto la severidad de las consecuencias de la materialización de los riesgos —previamente identificados en la fase de análisis de riesgos— como las probabilidades asociadas a dicha materialización. Debe considerarse como parte de un proceso continuo e iterativo durante todo el ciclo de vida del proyecto y, basada en metodologías adecuadas, debe establecer un marco robusto y fiable que permita evaluar las consecuencias e incertidumbres en cada una de las fases del proyecto.

En el caso específico de la evaluación de riesgos medioambientales en sistemas naturales alterados antropogénicamente, entre los que se encuentran los proyectos de carácter energético, estos sistemas incluyen los distintos compartimientos medioambientales, así como el medio geológico. Se trata de sistemas complejos con un elevado grado de incertidumbre aportado por la componente natural y que irá disminuyendo conforme se avance en las dis-

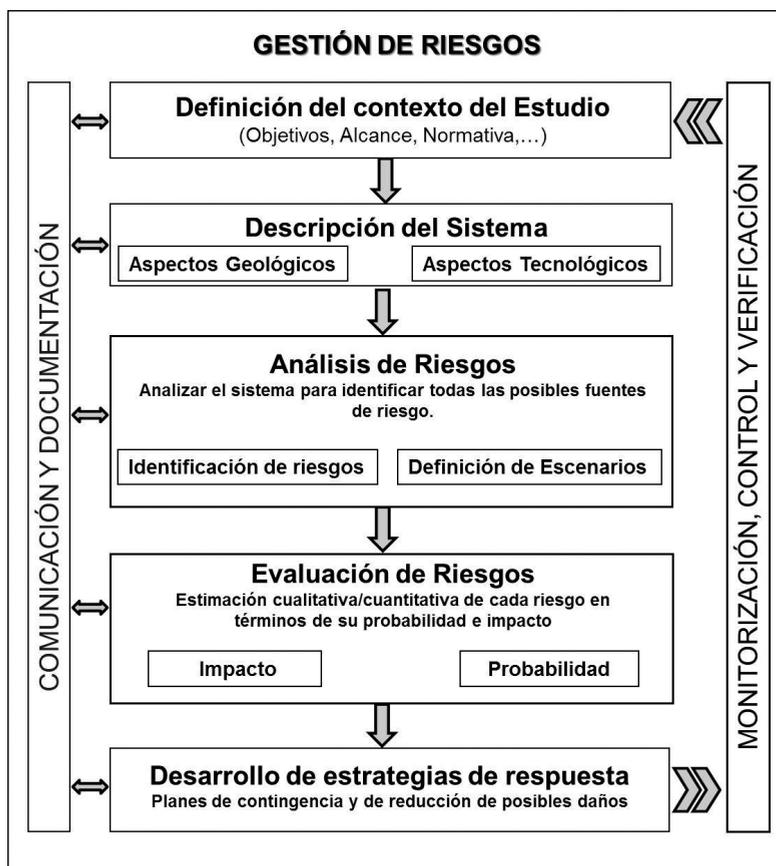


Fig. 1. Esquema de Gestión de Riesgos

tintas fases del proyecto. Sobre este sistema, debe ser implementada la competente tecnológica, que incorpora generalmente un grado de incertidumbre mucho menor, pero que tiene una influencia directa en el comportamiento del sistema. La estructura general de G. R. debe adaptarse a estas particularidades y cubrir todas las fases de estos proyectos. Sucintamente, estas comprenden: 1) la identificación inicial de formaciones geológicas objetivos de la perturbación tecnológica; 2) la caracterización de las mismas; 3) el desarrollo del proyecto; 4) el periodo operacional; 5) las operaciones posteriores al cierre en la fase previa de transferencia del control de la instalación; y, finalmente, 6) la transferencia de responsabilidades.

Derivado del elevado grado de incertidumbre, especialmente en las primeras fases de los geo-proyectos y maximizado en aquellos en que se trate del desarrollo de nuevas tecnologías, las evaluaciones de riesgos deberán poder incorporar la experiencia ya adquirida en otros proyectos de la misma clase, así como de tecnologías o emplazamientos análogos. Ello deberá enfocarse en la definición de las características más críticas que *a priori* deben ser tenidas en cuenta para garantizar una razonable gestión, medioambientalmente segura, de la tecnología.

Siempre debe estar presente en la mente de los responsables del proyecto, así como de los gestores públicos y, deseablemente, de la sociedad en su conjunto, que ningún proyecto es igual a otro debido a las variaciones impuestas por las características del medio natural de cada emplazamiento y su comportamiento en relación con el proceso del que se trate. Por ello, las herramientas a seleccionar para llevar a cabo la evaluación de los riesgos serán función de la complejidad del proyecto, de sus incertidumbres y de la fase del mismo. Sin embargo, puede adelantarse que, de manera general, incluyen estudios cualitativos y cuantitativos, tanto deterministas como probabilistas.

2. EVALUACIÓN DE RIESGOS MEDIOAMBIENTALES

Toda gestión de riesgo requiere la adopción de una política por parte de la organización al respecto, así como una definición de objetivos. Pero dichas acciones no significan nada sin una determinación operativa de los riesgos. Para ello, tras la identificación de las combinaciones del conjunto de causas que pueden dar lugar al mismo, se debe determinar la importancia de cada riesgo específico de manera que sirva de guía al proceso de respuesta al mismo.

En la fase de «Evaluación de Riesgos» es común el uso de los términos «probabilidad» e «impacto» (o «daño») para describir a las dos dimensiones del concepto «riesgo», objeto a estimar. Definidos unos objetivos, de carácter medioambiental en el caso que nos ocupa, con «probabilidad» se pretende recoger la incertidumbre ligada a la evolución de un sistema perturbado, sujeto a procesos internos o externos. Dicha evolución puede dar lugar a un o a un conjunto de «impactos», término que recoge los efectos, aquí medioambientales, del riesgo en estudio. La estimación de los impactos constituye un ejercicio estructurado que trata de responder a cuál sería el efecto si se diese un acontecimiento determinado. Para ello es necesario establecer las posibles evoluciones del sistema asociadas al escenario que se esté considerando y definir las vías y mecanismos de materialización de los impactos. El

conjunto de escenarios definidos para un proyecto tiene por objetivo alcanzar un conjunto de evoluciones del sistema a lo largo del tiempo que aporten una visión razonablemente completa de los posibles comportamientos del mismo. Estos escenarios definen el contexto, en términos amplios, en el que se deben realizar las etapas de modelización y de análisis de consecuencias que permitirán estimar, cualitativa o cuantitativamente, los riesgos en función de los objetivos inicialmente definidos. Un ejemplo de estimación puede verse en la Fig. 2, donde se muestra una aplicación en una matriz bidimensional Probabilidad-Impacto.

La evolución del proyecto va a estar influenciada, en todas sus fases, por una amplia gama de fuentes de incertidumbres, concepto fundamental de riesgo. Resulta fundamental identificar y gestionar dichas fuentes, que restan confiabilidad en el control de la evolución del sistema, especialmente en las primeras fases de todo proyecto con componente natural (ver Fig. 3).

Para que las evaluaciones de riesgo sean consistentes y significativas, es fundamental la aplicación de metodologías adecuadas en la evaluación de la probabilidad y del impacto. Las metodologías de evaluación se pueden dividir en dos grandes categorías: cualitativas y cuantitativas. La madurez tecno-

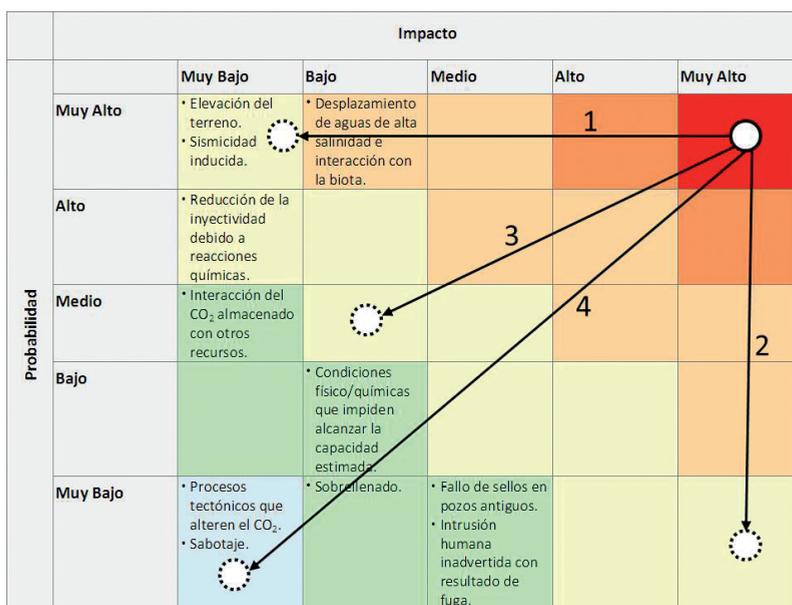


Fig. 2. Matriz bidimensional Probabilidad-Impacto asociada a un almacenamiento de CO₂ con ejemplos de riesgos y su clasificación (desde ROJO – Muy Elevado hasta AZUL – Despreciable) e ilustración de cuatro medidas de reducción de Riesgos:

1. Medida de reducción de Probabilidad.
 2. Medida de reducción de Impacto.
 3. Medida de reducción de Probabilidad e Impacto con coste reducido.
 4. Medida de reducción de Probabilidad e Impacto con coste elevado.
- Modificado de Metcalfe et al. (2017)

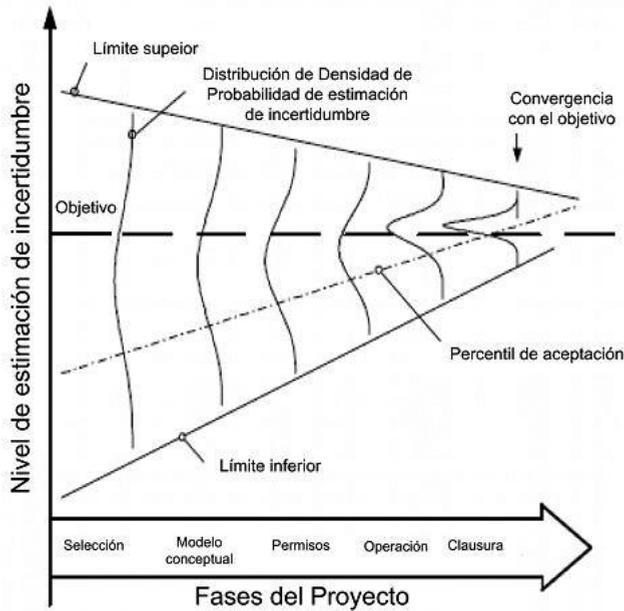


Fig. 3. Evolución general esperable de la incertidumbre a lo largo de las distintas fases de un proyecto

lógica o las lagunas en el conocimiento en la evolución de los sistemas naturales perturbados, así como de la fase del proyecto, determinan la naturaleza de la valoración a utilizar. Ante una elevada falta de información o conocimiento específico, una evaluación de riesgos cualitativa puede ser suficientemente efectiva y atractiva. En ellas, la asignación de probabilidades e impactos se realiza a través de niveles de significación. Entre los métodos cualitativos más comunes se encuentran: La matriz bidimensional Probabilidad-Impacto, el Marco de Evaluación de Vulnerabilidad (VEF), las técnicas estructuradas *What-if*, las Evaluaciones Multicriterios y el Marco de Evaluación y Clasificación (o *Screening and Ranking Framework* - SRF) (Pawar *et al.*, 2015). Esta última se ha utilizado satisfactoriamente en las evaluaciones tempranas de riesgos medioambientales centradas en sus efectos para la salud, la seguridad y el propio medio (o *Health, Safety and Environment* - HSE) (Liu y Ramírez, 2017), para la selección de posibles emplazamientos para el almacenamiento de CO₂ (Hurtado *et al.*, 2010) y para extracción de gas no convencional (Veiguela *et al.*, 2016). En ambos casos se trata de ejemplos claros de geo-proyectos con una limitación importante tanto en los datos iniciales como en el conocimiento sobre la evolución y consecuencias de los sistemas naturales perturbados.

Por su lado, los métodos cuantitativos se utilizan en sistemas mejor conocidos, con un nivel inferior de incertidumbre. Dos tipos principales de métodos pertenecen a este grupo: Evaluación de Riesgo Determinista (*Deter-*

ministic Risk Assessment o DRA) y Evaluación de Riesgo Probabilístico (*Probabilistic Risk Assessment* o PRA).

La DRA proporciona una estimación del impacto asociado a un escenario determinado, con un conjunto específico de modelos y de valores sin incertidumbre de los parámetros de los mismos. Este tipo de evaluaciones suelen ser útiles para modelar aspectos específicos del sistema. De hecho, es esperable el hacer uso de modelos deterministas con diversos grados de detalle en aspectos parciales de la estimación de impactos a lo largo de todo el proceso de evaluación de riesgos de un proyecto, porque resultan de utilidad en la determinación de tendencias de comportamiento del sistema cuando los parámetros varían individualmente.

Las PRA utilizan aproximaciones que abordan directamente las incertidumbres. Miden la credibilidad de una hipótesis basada en la evidencia que la soporta. Pueden representarse mediante una función de densidad de probabilidad, si se utiliza el concepto frecuentista de la probabilidad, o hacer uso del razonamiento incierto, o aproximado, relacionado con lógica difusa o modelos similares. Los enfoques utilizados en estos últimos pueden agruparse como sigue: Empíricas (MYCIN, Prospector); Métodos aproximados; Lógica difusa; Teoría de Dempster-Shafer y Redes Bayesianas (RR, BB).

3. APLICACIÓN DE LA EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE RIESGOS HSE EN LAS FASES INICIALES DE UN PROYECTO.

La implementación de metodologías y herramientas de evaluación temprana de riesgos medioambientales con la capacidad de evaluar sus impactos HSE en geo-proyectos (Almacenamiento Geológico de CO₂, Extracción de Gas no Convencional, Geotermia de Alta Entalpía, etc.), constituye un instrumento útil para fomentar el desarrollo y progreso de estas tecnologías contando con la confianza y aceptación pública hacia ellas. En las primeras etapas del proyecto, la falta de datos relacionados con el medio geológico y de experiencias directas en el uso de las tecnologías implicadas dificulta el uso de los enfoques existentes en desarrollos más avanzados, como pueden ser los de la industria petrolera y gasista, que implican un nivel de detalle más allá de lo que probablemente estará disponible.

En este sentido, a continuación, se presenta un modelo diseñado para evaluar el riesgo de HSE durante la selección inicial de emplazamientos para el almacenamiento geológico de CO₂ (Oldenburg, 2008), aplicado con éxito tanto en EE. UU. como en España (Hurtado *et al.*, 2010). Este modelo ha sido modificado para poder ser aplicado en estas primeras fases de desarrollo de proyectos de extracción de gas no convencional (Veigueta *et al.*, 2016).

La metodología utiliza información disponible de tipo cualitativo (estudios, informes, publicaciones, Juicio de Expertos) como aproximación para la evaluación de las posibles combinaciones de probabilidades y consecuencias. Muchas de las propiedades y de los valores considerados en estas primeras fases involucran estimaciones que podrán medirse y modelarse en fases posteriores. Dada la habitual ausencia de datos directos en las primeras etapas del proyecto, el mantener la incertidumbre como valor de entrada y salida en la metodología resulta una condición capital.

La metodología admite la evaluación de diferentes emplazamientos y diferentes escenarios (por ejemplo, relacionados con opciones tecnológicas de los pozos, de gestión de aguas, etc.) en una o en varias ubicaciones determinadas. Este proceso permite comparar diferentes opciones, lo que a su vez facilita el proceso de toma de decisiones.

Además, este enfoque constituye una poderosa herramienta de comunicación para informar a las partes interesadas mediante el intercambio de conocimientos y, en particular, sobre los riesgos evaluados.

La metodología es flexible y se puede adaptar a los distintos tipos de proyectos donde globalmente permitirá evaluar los dos aspectos principales de los proyectos energéticos en estudio: (1) los centrados en las propiedades naturales del emplazamiento y (2) los centrados en las propiedades tecnológicas del proyecto. Se describen los principales aspectos relacionados con el riesgo en función de sus características (c_i), es decir, las partes fundamentales en que se puede dividir el proyecto desde el punto de vista de sus riesgos HSE. Estas, a su vez, se descomponen en los atributos (a_i), que determinan cómo la característica c_i es competente en el cumplimiento de su función orientada al riesgo HSE. Finalmente, estos atributos son divididos en propiedades (p_i), en función de cuyos valores se determinará el comportamiento de los atributos respecto a los riesgos HSE.

En la Fig. 4 pueden verse las características y atributos asociados a una evaluación de los riesgos de un Almacenamiento de CO₂ y de una explotación de Gas no Convencional. La Fig. 5 muestra un ejemplo del conjunto característica/atributo/propiedad.

Los valores de las propiedades introducidos por el evaluador representan *proxis* o sustitutos razonables de los datos de caracterización o de resultados de modelizaciones relacionados con el emplazamiento o la tecnología, que pueden no conocerse en el momento de la evaluación. De esta manera, por ejemplo, la propiedad «litología» del atributo «Sello Primario» (Fig. 5) se utiliza como un indicador de permeabilidad y porosidad. La idea es que las dis-

Almacenamiento CO2		Gas No Convencional	
Característica	Atributo	Característica	Atributo
Potencial contención 1ª	Sello Primario	Aspectos Naturales	Profundidad de la formación sello
	Profundidad		Estabilidad del terreno
	Formación		Formación objetivo
Potencial contención 2ª	Sello secundario	Aspectos Tecnológicos	Características de la superficie
	Sellos superficiales		Pozos cercanos
Potencial atenuación	Características de la superficie		Integridad del pozo
	Hidrología del agua subterránea	Agua (consumo y gestión)	
	Pozos existentes	Impactos en superficie	
	Fallas	Emisión de metano	

Fig. 4. Características y atributos en los que los sistemas pueden descomponerse para permitir inferir su desempeño de riesgo HSE asociado, para un proyecto de Almacenamiento Geológico de CO₂ y de Extracción de Gas no Convencional

tribuciones de permeabilidad y porosidad pueden no estar disponibles en las primeras etapas del proyecto, pero la litología proporciona una representación inicial adecuada de estas propiedades. Las incertidumbres asociadas se introducen a través de valores de confianza asociados a cada propiedad. Por tanto, cada propiedad tiene asignados dos valores: uno medirá su comportamiento respecto al riesgo: el otro, la confianza del evaluador en el valor asignado.

Dada la naturaleza cualitativa de la estimación, se utiliza un criterio de asignación de valores pertenecientes a un rango $(-n, n)$, cuya función es reflejar la bondad de la propiedad respecto al riesgo HSE. El valor « $-n$ » se asigna a propiedades que implican los riesgos más altos. Por ejemplo, podría ser la existencia de pozos de especificaciones significativamente inferiores al de inyección en su zona de influencia, como podría ser el caso de pozos artesianos, en el caso de un proyecto de extracción no convencional de gas. Ello podría implicar un riesgo de contaminación alto y, por lo tanto, en función del análisis, a dicha propiedad podría asignársele un valor « $-n$ ». Del mismo modo, la ausencia de dichos pozos, implicaría un valor de « n ». Y a partir de ahí, un innumerable conjunto de casos con asignación de valores intermedios.

Además, como ya se ha mencionado, se introduce un valor que representa la confianza en el valor de la propiedad. Este valor tendrá, por ejemplo, tres valores: '2,0' si existe un alto grado de certeza en el valor asignado a la propiedad; '1,0' si el valor es mayoritariamente aceptado por la comunidad científica; y '0,1' si el valor se considera altamente incierto. Estas asignaciones, junto con la información disponible y las decisiones adoptadas deben incluirse en la evaluación para permitir la transparencia y la trazabilidad del proceso (Oldenburg, 2008). Los rangos cualitativos no deben ser extensos en demasía, dado el bajo nivel de información esperado. Los rangos mayores pueden parecer más precisos, pero la certeza asociada en esos casos sería menor.

Cabe señalar que los impactos HSE no deseados que podrían surgir debido a aspectos tecnológicos en el proyecto, generalmente están relacionados con deficiencias en el proceso y no con la tecnología en sí misma, y normalmente ligadas a entornos regulatorios pobres (Kibble *et al.*, 2014). En previsión de este fallo tecnológico, es necesario evaluar la capacidad de atenuación de los impactos HSE por los niveles secundarios del sistema geológico.

Finalmente, también deben examinarse y evaluarse las posibilidades de atenuación de los impactos, por ejemplo, por dispersión rápida en la atmósfera o mezcla con aguas a niveles seguros de los posibles contaminantes, así como los tiempos de reacción hasta alcanzar concentraciones peligrosas (Ma *et al.*, 2019), etc. Todo ello dependerá de las características tanto de los contaminantes como del emplazamiento a nivel de superficie. Esta situación se recoge mediante el concepto de «sistema de barrera múltiple», concepto ampliamente desarrollado en las investigaciones sobre garantía de la seguridad de sistemas que involucran los medios geológicos, como es el caso del almacenamiento geológico de CO₂ o el almacenamiento geológico de desechos radiactivos (Toth, 2011).

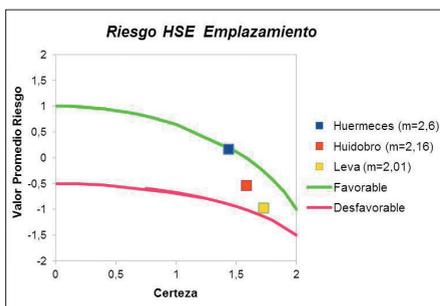


Fig. 5. Riesgos asociados a distintos emplazamientos para un proyecto de Almacenamiento Geológico de CO₂

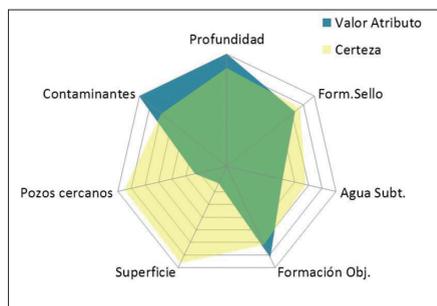


Fig. 6. Valoraciones de distintos atributos y sus incertidumbres en un proyecto de extracción de Shale Gas

El principal beneficio de la metodología indicada es que expresa de manera formal tanto el conocimiento como las incertidumbres asociadas, de tal forma que en futuras iteraciones podría ser revisado y modificado si se dispusiese de nuevos datos. El sistema admite un amplio grado de versatilidad, permitiendo al evaluador asignar distintos pesos en función de la importancia relativa para el riesgo de las distintas características/atributos/propiedades. La transparencia del sistema y su simplicidad permite a cualquier revisor alterar los pesos asignados y realizar nuevos análisis para comparar los efectos de esos cambios en la respuesta del sistema. Los resultados de la metodología permiten, por un lado, comparar los riesgos asociados a distintos emplazamientos (o escenarios de un mismo emplazamiento), como puede observarse en la figura 6. Además, también es posible examinar las relaciones entre las valoraciones de los atributos y sus certezas, estableciendo zonas de confort y zonas de atributos que deberían mejorar su caracterización (figura 7). Finalmente, cabe indicar que las áreas de seguridad de funcionamiento del sistema serán definidas, en fases mucho más avanzadas, por los valores de los Indicadores Fundamentales de Comportamiento del sistema (o *Key Performance Indicators* - KPI), (Yang *et al.*, 2012) asociados a las actividades de monitorización, lo que no es factible en las fases más tempranas.

4. CONCLUSIONES

Este documento ha pretendido mostrar que, toda vez definidos los objetivos, es posible generar nueva información aportando una dimensión de utilidad para la gestión de los riesgos medioambientales con impactos HSE, a partir de los datos ya existentes, desde las primeras etapas del proyecto, seleccionando, desarrollando y aplicando metodologías apropiadas.

El concepto holístico de la gestión de riesgos no pretende integrar todos los riesgos identificados y evaluados y sintetizarlos en un solo número. Pretende identificar, desde el principio, los riesgos de manera que sean gestionables, es decir, que ayude a una toma de decisiones con una asunción razonable de los riesgos. Ello requiere de un conocimiento mínimo del comportamiento del sistema complejo, lo que incluye una caracterización tan

aproximada como sea posible desde el punto de vista de los datos accesibles. Se trata, pues de un proceso estructurado que incluye una descomposición del sistema en subsistemas cuyos riesgos puedan ser analizados, estimados y, por tanto, gestionados. Lo anterior implica la generación de escenarios y sus análisis, la inferencia adecuada de las probabilidades, modelizaciones y simulaciones, la determinación de límites del funcionamiento seguro del sistema en función de los indicadores fundamentales de comportamiento, etc., y ello en la medida que sea posible en cada fase del geo-proyecto, lo que es especialmente complejo en las fases más tempranas, y donde se requiere una importante labor investigadora.

De hecho, una de las principales limitaciones para llevar a cabo lo anterior es la actual ausencia de un método, o combinación de métodos, estandarizados para la evaluación medioambiental del riesgo HSE en las primeras fases de geo-proyectos, con una componente natural importante. Así, desde que se propuso la captura y el almacenamiento de CO₂ como una opción de mitigación para reducir las emisiones antropogénicas de CO₂, ha habido importantes esfuerzos en el estudio de los riesgos potenciales a largo plazo del almacenamiento de CO₂ en formaciones geológicas. Por su parte, desde el punto de vista de la explotación de Gas no Convencional, también con un interesante papel en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, aunque ha sido una tecnología ampliamente aplicada en EE.UU., no ha habido un desarrollo paralelo de gestión medioambiental de riesgos, al menos, según los estándares impuestos por la Unión Europea.

La falta de datos en las primeras etapas y el nivel elevado de incertidumbre imposibilitan la aplicación o adaptación de métodos de evaluación cuantitativa de riesgos de uso en industrias afines. Se puede concluir que estos enfoques metodológicos no son un punto de partida conveniente para este tipo de proyectos, donde las decisiones en las primeras fases son elementos fundamentales para posibilitar su desarrollo en concordancia con las exigencias del legislador y de la sociedad. Para satisfacer las demandas generadas por estos entornos regulatorios cada vez más exigentes desde el punto de vista de los impactos HSE, se requiere de estos estudios que permitan una gestión holística de los riesgos medioambientales desde las primeras fases, lo que implica la necesidad del desarrollo de evaluaciones de tipo cualitativo que soporten una introducción gradual del tipo cuantitativo, como el enfoque metodológico más apropiado para el desarrollo de este tipo de geo-proyectos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEA, 2012. Support to the identification of potential risks for the environment and human health arising from hydrocarbons operations involving hydraulic fracturing in Europe. Informe de la DG Environment para la Comisión Europea, 11. AEA/R/ED57281. Disponible online: <https://ec.europa.eu/environment/integration/energy/pdf/fracking%20study.pdf>
- Chadwick, A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S., Zweigel, P., 2008. Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. British Geological Survey Occasional Publication 14, 267 p.
- Hurtado, A., Recreo, F., Eguilior, S., Lomba, L., Ruiz, C. 2010. Aplicación de una evaluación preliminar de la seguridad y de los riesgos HSE a las potenciales

- ubicaciones de una planta piloto de almacenamiento geológico de CO₂ *Comunicación Técnica en 10.º Congreso Nacional del Medioambiente (CONAMA)*. ISBN 978-84-614-6112-7.
- ISO, 2009. *ISO/IEC Guide 73:2009. Risk Management-Vocabulary*. International Organization for Standardization, 15 p.
- Kibble, A., Cabianca, T., Daraktchieva, Z., Gooding, T., Smithard, J., Kowalczyk, G., McColl, N. P., Singh, M., Mitchem, L., Lamb, P., Vardoulakis, S., Kamanyire, R., 2014. *Review of the Potential Public Health Impacts of Exposures to Chemical and Radioactive Pollutants as a Result of the Shale Gas Extraction Process Public Health England*. PHE-CRCE-009, 52 p.
- Liu, W., Ramírez, A., 2017 State of the art review of the environmental assessment and risks of underground geo-energy resources exploitation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76: 628–644.
- Ma, L., Hurtado, A., Eguilior, S., Llamas, J. F., 2019 Forecasting concentrations of organic chemicals in the vadose zone caused by spills of hydraulic fracturing wastewater. *Science of the Total Environment*, 696: 133911
- Metcalfe, R., Thatcher, K., Towler, G., Paulley, A., Eng, J., 2017. Sub-surface risk assessment for the Endurance CO₂ Store of the White Rose Project, UK. *Energy Procedia*, 114: 4313-4320.
- Oldenburg, C. M., 2008. Screening and ranking framework for geologic CO₂ storage site selection on the basis of health, safety and environmental risk. *Environmental Geology*, 54: 1687-1694.
- Pawar, R. J., Bromhal, G. S., Carey, J. W., Foxall, W., Korre, A., Ringrose, P. S., Tucker, O., Watson, M.N., White, J.A., 2015. Recent advances in risk assessment and risk management of geologic CO₂ storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 40: 292-311.
- PMI (Project Management Institute), 2000. *A guide to the project management body of knowledge (PMBOKR)*. Project Management Institute, Newtown Square, Pennsylvania, USA, 209 p.
- Toth, F. L. (ed.) 2011. *Geological Disposal of Carbon Dioxide and Radioactive Waste: A Comparative Assessment*. Springer. Advances in Global Change Research, 44, 621 p.
- Veiguela, M., Hurtado, A., Eguilior, S., Recreo, F., Roqueñi N., Loredó, J., 2016. A risk assessment tool applied to the study of shale gas resources. *Science of the Total Environment*, 571: 551–560.
- Yang, Y. M., Small, M. J., Ogretim, E. O., Gray, D. D., Wells, A. W., Bromhal, G. S., Strazisar, B. R., 2012. A Bayesian belief network (BBN) for combining evidence from multiple CO₂ leak detection technologies. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2(3): 185-199.