



Technische
Hochschule
Georg Agricola
University

Done for Good

Resultados de la investigación en posminería

Una recopilación de artículos de investigación
por el Forschungszentrum Nachbergbau
Technische Hochschule Georg Agricola University

Editores:

Prof. Dr. Jürgen Kretschmann

Prof. Dr. Peter Goerke-Mallet

Prof. Dr. Christian Melchers



Done for Good

Resultados de la investigación en posminería

Done for Good

Resultados de la investigación en posminería

**Una recopilación de artículos de investigación
por el Forschungszentrum Nachbergbau
Technische Hochschule Georg Agricola University**

Editores:

Prof. Dr. Jürgen Kretschmann

Prof. Dr. Peter Goerke-Mallet

Prof. Dr. Christian Melchers



Editores:

Prof. Dr. Jürgen Kretschmann

Presidente de la Technische Hochschule Georg Agricola University, Alemania

Prof. Dr. Peter Goerke-Mallet

Prof. Dr. Christian Melchers

Research Center of Post-Mining,

Technische Hochschule Georg Agricola University, Alemania

Concepción:

Prof. Dr. Peter Goerke-Mallet

Formato:

Laura Klein

Diseño de portada:

Martha Poplawski

Fotografía de portada: Bastian Reker

Traducción:

Marina Herrera Romero, Susana Primo Doncel, Hernán Flores, Paloma Primo Doncel,
Sara Restrepo

© Selbstverlag der Technischen Hochschule Georg Agricola, Bochum 2022

Reservados todos los derechos

Esta edición ha sido traducida y publicada bajo la licencia de Selbstverlag der Technischen Hochschule Georg Agricola, Bochum 2022

Dirección:

Herner Straße 45

44787 Bochum

Impreso por:

Papierflieger Verlag GmbH

Telemannstraße 1

38678 Clausthal-Zellerfeld

ISBN: 978-3-949115-05-9

Impreso en Alemania.

Contenido

Prólogo	XII
Capítulo 1 - Posminería y ciclo de vida de la mina	
<i>Christian Melchers / Peter Goerke-Mallet</i> Posminería: Actividades y perspectivas	17
<i>Kai van de Loo / Jürgen Brüggemann</i> Investigación posminera sobre reactivación y transición	32
<i>Peter Goerke-Mallet / Christian Melchers</i> El ciclo de vida minero y la Agenda 2030 de las Naciones Unidas - Un análisis sostenible	45
<i>Peter Goerke-Mallet / Frank Mersmann / Thorsten Beermann / Max Thomas Stöttner</i> Optimización de la gestión de agua de mina a largo plazo en explotaciones de minas mediante perforación direccional y tecnología de revestimiento	61

Capítulo 2 - Subida del agua de la mina

Bastian Reker / Peter Goerke-Mallet / Sebastian Westermann / Christian Melchers

La hulla española y la posminería: impresiones de Asturias

71

Christian Melchers / Sebastian Westermann / Bastian Reker / Peter Goerke-Mallet

Procesos de ascenso del agua de mina en yacimientos carboníferos europeos -

Experiencias y Hallazgos

88

Capítulo 3 - Medidas de supervisión

<i>Kian Pakzad / Andreas Mütterthies / Peter Goerke-Mallet / Christian Melchers / Chia-Hsiang Yang / Uwe Soergel</i> Seguimiento de los procesos relevantes para el balance hídrico en minería mediante teledetección	107
<i>Peter Goerke-Mallet / Peter Hoglebe / Andreas Welz / Christian Melchers / Tobias Rudolph</i> Vigilancia de galerías de drenaje	114
<i>Tobias Rudolph</i> Digital-Twin - Un mayor desarrollo del geomonitoreo integrado	125
<i>Tobias Rudolph / Peter Goerke-Mallet / Christian Melchers</i> Geomonitoreo en antiguas minas y posminería	131
<i>Bodo Bernsdorf / Anna Formaniuk / Tobias Rudolph</i> Planteamiento para la detección de fugas de gas mediante el uso de cámaras de imagen termográfica en UAV	140
<i>Bodo Bernsdorf / Tobias Rudolph / Peter Goerke-Mallet</i> Uso de drones en las industrias minera y energética - Mejora de la gestión de riesgos y de la comunicación con los stakeholders	161
<i>Tobias Rudolph / Peter Goerke-Mallet</i> Aumentar la aceptación social en la gestión de depósitos de residuos (GDR)	183

Capítulo 4 - Licencia internacional

*Peter Goerke-Mallet / Jürgen Brune / Stefan Möllerherm / Jürgen Kretschmann /
Tobias Rudolph / Andreas Mütterthies*

Analítica posminera desde el espacio: un enfoque innovador para mejorar la
gestión de riesgos en la minería 197

Peter Goerke-Mallet / Tobias Rudolph / Jürgen Brune / Jürgen Kretschmann
La importancia de la licencia social para operar para el ciclo de vida minero 206

Perspectivas

Ulrich Paschedag

El Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau):
fundado en 2015, avanzando hacia un futuro prometedor 221

Prólogo



La minería deja huella. Enfrentarse a este legado, ocuparse del escenario «posminero¹», es un reto global: en todo el mundo, la minería ha tenido un profundo impacto en el desarrollo cultural, económico y ecológico de muchas regiones, cambiando paisajes, ciudades y estructuras de población. El proceso de transición tras el cierre de una mina puede durar mucho tiempo y suele considerarse una etapa de peligros, riesgos y altos costes. Especialmente en los países con una gran tradición minera, los elementos del ámbito posminero tienen un gran impacto.

También contemplamos el potencial de la fase posminera: el cierre de minas puede verse como una oportunidad para desarrollar las infraestructuras industriales y urbanas de forma sostenible y orientada al futuro. Por lo tanto, es importante hacer que las antiguas regiones mineras se conviertan en lugares dinámicos y que las que fueron ciudades mineras sigan prosperando. Las actividades posteriores a la minería requieren un alto nivel de motivación así como de habilidades y competencias. Por ello, la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA por sus siglas en alemán) ofrece el programa de máster Geoingenieurwesen und Nachbergbau («ingeniería geotécnica y en posminería» en español) y ha fundado el Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN por sus siglas en alemán). Situado en la metrópoli del Ruhr- la mayor aglomeración y zona posminera de Alemania-, el Centro de Investigación de Posminería desarrolla soluciones innovadoras que pueden servir de modelo para la implantación de la posminería en todo el mundo. Nos sentimos obligados a compartir nuestros conocimientos con los demás, a actuar de acuerdo con los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y a hacer realidad la visión de «ingeniería para un mundo mejor».

Esta recopilación presenta una serie de artículos de investigación sobre métodos modernos de control, tecnologías y conceptos innovadores aplicados durante la fase posminera. Lo especial de este libro es que se basa en situaciones prácticas. Se enfoca principalmente en los requisitos de la industria minera e integra aspectos técnicos, ecológicos y socioeconómicos. Se espera que las correctas actuaciones posteriores a la

¹ N. de T.: Se utilizan los términos «posminero», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

actividad minera tengan un impacto altamente positivo en la aceptación de la minería en todo el mundo y en las generaciones venideras.

Desde hace muchos años, la THGA mantiene buenas relaciones con diferentes universidades de todo el mundo y promueve un importante intercambio científico. Yo mismo he podido visitar universidades y empresas mineras en seis continentes y dar numerosas conferencias sobre posminería. Después de casi 30 años tratando con las consecuencias del cierre de minas, me sigue pareciendo desafiante.

Una estrecha colaboración une a la THGA con las universidades mineras de España y Sudamérica. Nuestra red tiene una larga tradición en los países de habla hispana, con un objetivo común: una minería segura, compatible con el medio ambiente y eficaz económicamente. Las instituciones científicas pueden contribuir de manera significativa a ello. La investigación en posminería y los diversos procesos de transformación son hoy más relevantes e interesantes que nunca.

En este momento quisiera agradecer personalmente a todos los que han contribuido al éxito de «*Done for Good*». Sin los numerosos trabajos de investigación y los artículos resultantes, este libro no habría sido posible. En total, 22 autores y coautores participaron en esta recopilación.

Estoy muy satisfecho con el tiempo y el trabajo que se ha dedicado a los artículos. Ninguna recopilación nace sin una buena gestión del proyecto. Mi especial agradecimiento a mis compañeros Peter Goerke-Mallet y Christian Melchers, así como a Laura Klein y Martha Poplawski, que se encargaron de las tareas de coordinación. Un agradecimiento muy especial a Hernán Flores, Marina Herrera Romero, Paloma y Susana Primo Doncel, Sara Restrepo por la traducción de los manuscritos al español.

Desde que mi compañero Ulrich Paschedag asumió la dirección del FZN, esta ha experimentado importantes cambios a nivel organizativo, de alcance y de desarrollo orientado. Por ello le debo mi más sincero agradecimiento.

Por último, pero no por ello menos importante, me gustaría expresar mi especial agradecimiento a todo el personal implicado del FZN que ha hecho posible un desarrollo satisfactorio de la investigación y la transmisión de conocimiento gracias a su cooperación y dedicación. Además me gustaría hacer especial mención a Bärbel Bergerhoff-Wodopia, miembro del consejo de administración de la RAG Aktiengesellschaft; a Peter Schrimpf, presidente del consejo de administración de RAG Aktiengesellschaft; y al Prof. Dr. Andreas Pinkwart, ministro de Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie («Economía, Innovación, Digitalización y Energía») y máxima autoridad de nordrhein-westfälischen Bergbehörde («Administración Minera de Renania del Norte-Westfalia»).

Prof. Dr. Jürgen Kretschmann

Presidente de la Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Capítulo 1 - Posminería y ciclo de vida de la mina

Posminería: Actividades y perspectivas

Christian Melchers, Peter Goerke-Mallet

Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Resumen

La demanda de materias primas ronda las 5 toneladas por persona al año y es cubierta principalmente gracias a la producción en las explotaciones mineras. La importancia mundial de la minería se encuentra cada vez más en el punto de mira debido al aumento de la población global, a las tecnologías del futuro y a la demanda de materias primas, así como al acoplamiento de los sectores eléctrico, de transporte y térmico. Se están planteando cada vez más cuestiones sobre los aspectos sociales, éticos y morales relacionados con la extracción de materias primas y los proyectos mineros.

La industria minera solo puede ganar los debates sociales y políticos si se examina y aborda todo el ciclo de vida de la minería. Esto se aplica particularmente a la fase «posminera¹», que suele ser el periodo más largo del ciclo de vida de los proyectos mineros. En las fases de exploración y extracción se crean unas condiciones previas indispensables, que influyen en la duración y la complejidad de las cuestiones dentro de la posminería. El cierre de una explotación minera conlleva, sin duda, una serie de retos técnicos y económicos. Sin embargo, hay una cuestión central que influye especialmente en la aceptación de la extracción de materias primas y del impacto implícito del sistema en el medioambiente. ¿Qué perspectivas se están creando para la población local y cómo se preservará el legado minero de forma sostenible?

El Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) enseña e investiga sobre los retos de la posminería en la República Federal de Alemania. Para una mejor comprensión del sistema y del proceso, también se evalúan los resultados de las actividades de cierre y conservación, tanto en Europa como en otras regiones del mundo. Reciben especial atención aquellas cuestiones relacionadas con el ascenso del nivel del agua de mina y los procesos que tienen lugar tanto en las masas de agua como en el espacio subterráneo. En este sentido, las medidas innovadoras de vigilancia desempeñan un papel fundamental.

El cese de la minería del carbón en Renania del Norte-Westfalia y el Sarre ha dado lugar a tareas permanentes en relación con el drenaje en las antiguas explotaciones mineras y en los pólderes. La financiación corre a cargo de los fondos de la Fundación RAG. La gestión de las tareas permanentes parte del conocimiento exhaustivo del ciclo de vida de la minería, de sus procesos

¹ N. de T.: Se utilizan los términos «posminero», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

específicos e impactos medioambientales, así como de una potente gestión del conocimiento. En este contexto, el presente artículo expone los resultados de la investigación actual y muestra las perspectivas para una planificación y ejecución de los proyectos mineros compatibles social y medioambientalmente.

1 Introducción

En Alemania, país (pos)minero, se extraen anualmente unos 750 millones de toneladas de materias primas. De ellas, 500 millones corresponden a los áridos (grava, arena, piedra natural), producidos por el sector nacional de los áridos. En lo referente a la población, la producción minera suma, por tanto, unas 10 toneladas anuales por habitante. A nivel internacional, se estima una demanda de materias primas de unas 5 toneladas anuales por habitante. Debido al aumento de la población mundial, a las tecnologías del futuro y a la demanda de materias primas, así como al acoplamiento de los sectores eléctrico, de transporte y térmico, la importancia mundial de la minería se encuentra cada vez más en el punto de mira (Goerke-Mallet et al. 2018). Es evidente que los debates políticos y sociales sobre el suministro de materias primas abordan cada vez más aspectos sociales, éticos y morales.

Desde un punto de vista científico, la respuesta de las industrias mineras y extractivas debe ser garantizar la transparencia de todo el ciclo de vida de la minería y de los flujos de materias primas. La aceptación de la extracción de materias primas y de su impacto implícito en el medioambiente depende de cómo se aborden los impactos sociales y ecológicos. Ya que Alemania no solo obtiene sus materias primas minerales de fuentes nacionales, sino también de más de 160 países de todo el mundo, los ejemplos de *best practice* (mejores prácticas) deberían darse a conocer y discutirse en el ámbito internacional. Esto se aplica, entre otras cosas, a las normas de la industria extractiva alemana en lo que respecta a la distribución y gestión del personal, la seguridad laboral y la protección del medioambiente. El Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales) apoya a varios países en la mejora de la gestión de proyectos mineros (BGR 2018).

La sostenibilidad en la industria extractiva también está muy relacionada con la transparencia de los flujos de materiales. Entre otras cosas, se trata de garantizar que los ingresos procedentes de la extracción y el comercio de materias primas no se utilicen para financiar conflictos armados. Aquí entra en juego la tecnología blockchain (cadena de bloques), que según los expertos tiene el potencial de revolucionar la extracción, el procesamiento y la comercialización del oro y otros metales preciosos (Mining.com 2018). Esto quiere decir que todos los procesos de negocio, desde la mina hasta el consumidor final, podrían hacerse transparentes mediante el uso de blockchain y, así, se podría evitar la competencia desleal.

Un ámbito de actividad particular dentro del ciclo de vida de la minería es la fase posminera, que suele ser el período más largo del ciclo de vida de los proyectos mineros. En esta fase se plantean diversos retos técnicos y económicos. No obstante, hay que tener en cuenta que las fases de exploración y extracción influyen en la complejidad y

la duración de las actividades posmineras (Figura 1). El foco de atención de la posminería está puesto en los elementos mineros (antiguos), en su clasificación dentro de la gestión de riesgos, en el seguimiento adaptado, así como en las medidas de seguridad y rehabilitación, terminando con la mejora permanente de la comprensión del sistema y los procesos. Los ciudadanos de las regiones afectadas deben centrar sus esfuerzos en el mantenimiento sostenible del legado minero y en tener unas perspectivas económicas renovadas y resistentes.



Figura 1: La importancia de la posminería en el ciclo de vida de la mina.

La respuesta eficaz y significativa a las cuestiones a lo largo del ciclo de vida de la mina viene de la mano de la gestión del conocimiento. En lo que respecta a la fase posminera, solo sobre esta base se puede llevar a cabo una gestión adecuada de riesgos y oportunidades. Las actividades que realiza el Centro de Investigación de Posminería de la THGA hace frente a los retos mencionados (Melchers und Goerke-Mallet 2018). La idea principal es: «¡No se acaba cuando se ha acabado!»

2 Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau)

El Centro de Investigación de Posminería de la THGA, fundado en 2015, trabaja con sus socios para desarrollar los fundamentos científicos para un ascenso sostenible del agua de las minas en las cuencas carboníferas del Ruhr, el Sarre e Ibbenbüren. El FZN se considera una entidad de transferencia y gestión de conocimientos (Goerke-Mallet et al. 2016a).

El objetivo es conservar los conocimientos técnicos, trabajar en líneas de investigación propias y establecer cooperaciones. Entre otros, los proyectos incluyen:

- Análisis del ascenso del agua de las minas en Alemania y en otros países europeos
- Mediciones en las masas de agua de las minas para determinar la estratificación por densidades
- Vigilancia del proceso de ascenso del agua en minas subterráneas
- Investigaciones de galerías inundadas o de drenaje
- Seguimiento en antiguas minas y posminería
- Gestión del conocimiento

Gracias al Centro de Investigación de Posminería, la THGA de Bochum tiene la capacidad de trabajar de forma integral en cada uno de los elementos y aspectos de la posminería. Esta es una actividad vital, que, en parte, no tendrá fin. Esto es así tanto a nivel nacional como internacional. De acuerdo con el entendimiento jurídico existente en Alemania, el antiguo empresario minero posee una responsabilidad especial.

3 Retos de la posminería

En la figura 2 se muestran los principales retos que entraña la posminería. En la tabla también se dividen los temas en los aspectos principales (Melchers et al. 2016).

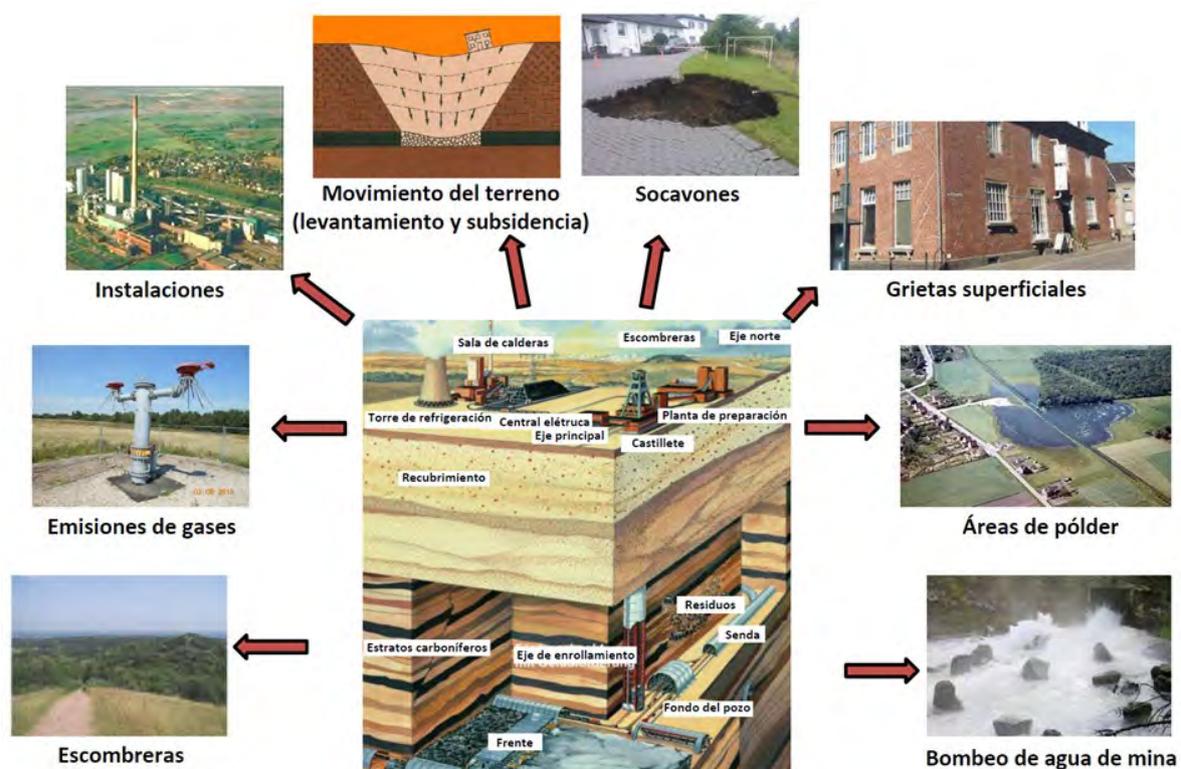


Figura 2: Campos de actuación de la posminería (sentido de las agujas del reloj desde abajo a la izquierda: 1.) THGA, 2.) THGA, 3.) Boese & Farrenkopf 2014, 4.) Kratzsch 2013, 5.) DMT, 6.) Baglikow 2012, 7.) EGLV, 8.) City of Bochum, 9.) GvSt).

Tabla 1: Temas dentro de la posminería.

<p>Agua y gas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ascenso del agua de mina • Tratamiento del agua de la mina • Depuración de aguas subterráneas • Medidas en el pólder • Grisú • Uso del grisú 	<p>Terreno y desarrollo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo del terreno • Recultivo y uso posterior de escombreras • Tratamiento de daños de la minería • Procesos de transición y transformación
<p>Suelo y pozos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Seguridad del pozo • Contaminación del suelo • Seguridad de la estructura de la mina • Galerías de drenaje 	<p>Supervisión y gestión de riesgos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Investigación histórica • Gestión del conocimiento • Análisis del impacto • Supervisión

3.1 Tema «agua y gas»

Al cese de la minería del carbón subvencionada se le relaciona el cese definitivo o temporal del drenaje subterráneo. Como consecuencia, se produce un aumento del nivel del agua de mina. El control de la subida del agua de las minas debe diferenciarse de la tarea permanente de «drenaje de pólder». Las aguas receptoras han perdido a menudo su fluidez natural debido al hundimiento del terreno como resultado de la minería subterránea. Las medidas de contención de agua llevadas a cabo, así como las extensas zonas hundidas, dieron lugar a pólderes.

La gestión de las aguas pluviales requiere una amplia red de unidades de bombeo. En cuanto a las condiciones de drenaje subterráneo, la Cuenca del Ruhr se divide en tres áreas:

1. Minas de carbón activas (mina Prosper-Haniel en Bottrop; cese en diciembre de 2018),
2. zonas clausuradas dentro del sistema central de desagüe (las llamadas cuencas de drenaje),
3. zonas clausuradas independientes en la franja oriental de la Cuenca del Ruhr (RAG AG 2016).

En las zonas clausuradas ya se han producido subidas parciales del nivel del agua de la mina. Al cese definitivo de la producción de carbón en la Cuenca del Ruhr le seguirá la optimización del proceso de drenaje a largo plazo. La corporación minera de carbón RAG AG prevé una subida controlada del agua de la mina en zonas amplias del yacimiento del Ruhr, donde se garantiza, de manera general, una distancia de seguridad suficiente con respecto a los horizontes de agua potable. En seis puntos del desagüe

central el agua de la mina se bombea a la superficie de manera prolongada mediante bombas sumergibles y se vierte en las aguas receptoras del Ruhr, el Lippe y el Rin (Drob-niewski 2018).

En este contexto, es especialmente importante comprender la evolución de la subida del agua de la mina (Figura 3) (Melchers & Dogan 2014; Westermann et al. 2017). Las investigaciones contribuyen a una comprensión científica más profunda de los fundamentos del proceso de subida del agua de las minas.

Estas se centran en el análisis del desarrollo espaciotemporal de la subida del nivel del agua de la mina y de los efectos e interrelaciones consecuentes, que influyen en el cambio cuantitativo y cualitativo del agua de la mina drenada, en los movimientos del suelo derivados del proceso y en las migraciones de gas cerca de la superficie. La visión del conjunto permite identificar las relaciones de causalidad universales asociadas a una subida de agua en la mina, separar las características especiales a nivel local y transferir estas a otros yacimientos de carbón en los que las subidas de agua en la mina sean inminentes.

En relación con esto, se están desarrollando los fundamentos científicos para lograr un nivel de aumento del agua sostenible en las minas del Ruhr, el Sarre e Ibbenbüren. El proyecto de investigación cuenta con la financiación de la Fundación RAG.

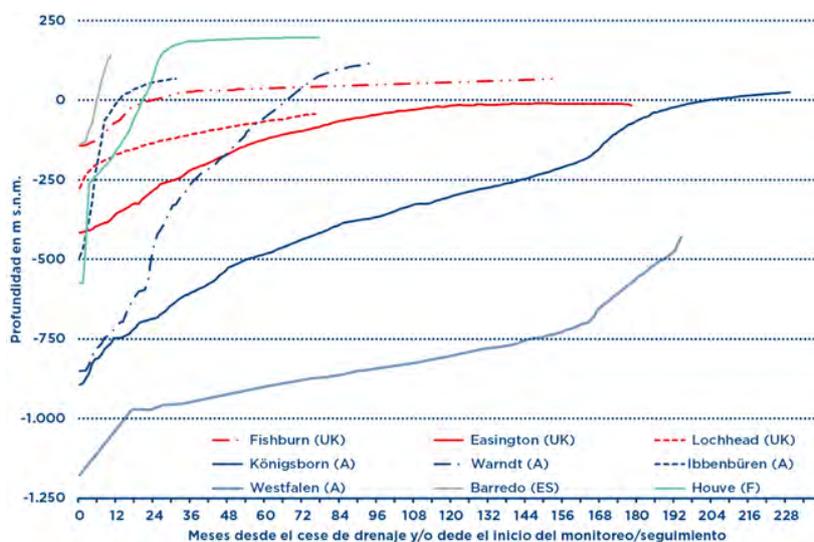


Figura 3: Comparación de la evolución del ascenso del agua de mina en las minas de carbón clausuradas.

En relación con esto, cabe mencionar otros dos proyectos de investigación que persiguen medir, analizar y comprender el proceso de subida del agua de las minas, así como los procesos que tienen lugar en las masas de agua subterráneas. Por un lado, se miden diversos parámetros con ayuda de sondas en las labores mineras de la antigua mina Auguste Victoria, que pronto dejará de ser accesible, y los datos son transferidos a la superficie por medio de conexiones por cable. Se miden, entre otras cosas, el nivel del agua, la temperatura, la velocidad del flujo, la presión del aire y la concentración de metano.

El segundo proyecto tiene como objeto de estudio la llamada estratificación por densidades en las masas de agua de las minas. Así, los efectos de la temperatura pueden provocar la formación de células de convección estables. Entender este proceso es crucial para la planificación de la subida del agua de la mina.

Los trabajos de investigación del FZN también se centran en las repercusiones del aumento del nivel del agua de las minas. El ascenso del agua de mina en el yacimiento y en el recubrimiento causará el levantamiento de la superficie. En varias cuencas mineras se produjeron ascensos de agua y esto a su vez ocasionó levantamientos de hasta 30 cm, en su mayoría controlables. Excepcionalmente en un caso documentado, concretamente la subida de agua en la zona minera de Erkelenz, los levantamientos causaron daños en los edificios e infraestructuras de la superficie. En este caso, se había producido la reactivación de una falla tectónica considerable.

A lo largo de los siglos, la minería ha influido en la morfología del paisaje. En los últimos 120 años, se han producido en algunas zonas de la Cuenca del Ruhr subsidencias de la superficie de más de 25 m (Harnischmacher 2010). El paisaje originalmente llano entre los ríos Emscher y Lippe, ahora caracterizado por las subsidencias minera, presenta grandes pólderes sin drenar en estas depresiones (Figura 4). Por lo tanto, las aguas que desembocan en el Rin tuvieron que ser canalizadas hacia una superficie amplia y se desarrolló un sistema hidrológico con una fuerte influencia antropogénica. Actualmente se encuentran en funcionamiento más de 300 estaciones de bombeo para compensar la pérdida de agua receptora natural y mantener la superficie seca (EGLV 2013, LINEG 2016). Estas estaciones bombean anualmente unos 850 millones de m³ de agua de los terrenos pólder al oeste y al este del Rin.



Figura 4: Pólder en la Cuenca del Ruhr (EGLV 2013).

El metano del yacimiento puede desplazarse al subir el agua de la mina. Esto puede provocar fugas de gas hacia la superficie. El uso del grisú mediante su extracción puede contrarrestar este riesgo. Dentro de la gestión del conocimiento, el FZN documenta todos los hallazgos disponibles que contribuyan a mejorar la comprensión de los procesos de migración de gases.

3.2 Tema «suelo y pozos»

Existe una gran cantidad de pozos, minas profundas y cavidades cercanas a la superficie que requieren un mantenimiento permanente para evitar daños en la superficie y garantizar su uso posterior. Por todo ello, hace unos años se introdujo la gestión de riesgos, tanto por parte de los empresarios de las minas como de las autoridades. En 2017, el ciclo de conferencias «*NACHBergbauzeit in NRW*» (Periodo Posminero en NRW), organizado conjuntamente por la autoridad minera del estado de NRW (siglas de Renania del Norte-Westfalia) y la THGA, expuso principalmente los avances de los últimos años bajo el título «*Risiken erkennen und beherrschen - Definitionen, Umsetzungen und Erfahrungen*» (Identificación y gestión de riesgos: definiciones, implementaciones y experiencias) (Bezirksregierung Arnsberg & THGA 2017).

La protección de pozos y labores mineras poco profundas se realiza rellenando la cavidad con hormigón u otros materiales usando la última tecnología. Sin embargo, el gran número de pozos y labores mineras que hay que asegurar y rellenar supone un enorme reto organizativo y económico para un territorio minero del tamaño de la Cuenca del Ruhr.

La descontaminación de los terrenos contaminados durante las antiguas actividades mineras es obligatoria en Alemania según la legislación actual, por ejemplo, según la Ley Federal para la Protección del Suelo (BBodSchG 2017). En relación con este fin, existen multitud de alternativas realizables para cada caso concreto. El espectro va desde el intercambio de suelos y la incineración de las masas descontaminadas en instalaciones especializadas, pasando por la limpieza del lugar, hasta el asentamiento seguro de los suelos mediante movimientos de tierra especiales. Tras la rehabilitación profesional de las zonas y el desmantelamiento de las instalaciones mineras que ya no pueden utilizarse, las antiguas superficies mineras son valiosos recursos de tierra para usar en un futuro.



Figura 5: Salida del agua de la mina en una galería de drenaje (Foto: I. Michel).

Las galerías de drenaje también forman parte del conjunto de temas tratados aquí. En el sur de la Cuenca del Ruhr, las capas de carbón no tienen recubrimiento y, en gran parte, carecen de la estratos suprayacentes. Aquí es donde la minería del carbón nace. Cuando se fue penetrando en las profundidades, el problema del drenaje en las labores mineras se hizo cada vez más acuciante. Antes de que se introdujera la elevación mecánica del agua de la mina por medio de la energía del vapor -alrededor de la primera mitad del siglo XIX- se excavaron al sur de la Cuenca del Ruhr galerías de drenaje con conexión al Ruhr (Figura 5). A través de estas galerías, los mineros podían drenar el agua generada en la mina hacia las aguas receptoras gracias a la gravedad. De este modo, el proceso de producción del carbón podía funcionar con seguridad y eficacia hasta el nivel de las galerías.

Las galerías de drenaje se encuentran por todo el mundo en regiones mineras con topografía diversa. Su tarea es drenar las labores mineras conectadas y el macizo rocoso. Esta actividad no termina con el cese de la mina en cuestión. Por el contrario, las galerías de drenaje de la zona sur del Ruhr, al igual que en otras partes del mundo, siguen teniendo un impacto considerable en la hidrología y, por tanto, en el balance hídrico de su entorno. Esta situación problemática ha llevado al grupo de trabajo AK 4.6, que cuenta con el apoyo de la DGGT (Sociedad Alemana de Geotécnica) y la DMV (Asociación Alemana de Topógrafos), a abordar la cuestión de las «galerías de drenaje». En 2017, se hizo pública una recomendación sobre este asunto durante el Coloquio sobre Antiguas Minas en Freiberg (Arbeitskreis „4.6“ der DGGT und des DMV 2017).

En el marco del registro de galerías de drenaje del sur de la Cuenca del Ruhr, llevado a cabo por el FZN y la autoridad minera del estado de Renania del Norte-Westfalia, el objetivo inicial era identificar de manera completa las antiguas galerías de drenaje. De hecho, en el transcurso de los últimos años se han encontrado más de 100 galerías de drenaje en el terreno, se han determinado sus coordenadas y evaluado tanto el caudal como la calidad del agua. Las demás investigaciones se han centrado en la vigilancia y la evaluación del impacto de las galerías de la mina y de las labores mineras conectadas de la superficie. El programa de seguimiento incluye, entre otras cosas, el registro continuo del flujo del agua y la observación de los movimientos del suelo, así como los cambios en el contenido de agua del suelo y la vegetación.

3.3 Tema «terreno y desarrollo»

Durante la fase posminera, la conversión de la mina es una cuestión que se plantea en todas las regiones mineras. Por un lado, los proyectistas se enfrentan a menudo a superficies muy grandes que fueron necesarias para albergar las instalaciones superficiales de la mina, así como para las balsas de lodo y las escombreras. Por otro lado, estos terrenos presentan un alto grado de deformación antropogénica. No es raro que estos lugares hayan desarrollado sus características naturales a lo largo de los años, relevantes para el diseño y que deberían tenerse en cuenta en desarrollos futuros.

En las antiguas áreas con minas también se puede construir una infraestructura para el uso de energías renovables en las regiones industriales. En algunas localizaciones se ha aprovechado el potencial energético del agua de las minas. Además, los grandes terre-

nos abiertos permiten la instalación de sistemas fotovoltaicos. Son especialmente interesantes las zonas con viento fuerte de las escombreras, donde se puede llevar a cabo la construcción y puesta en marcha de instalaciones eólicas.

En cuanto a la necesidad de crear nuevas oportunidades para las regiones afectadas por el cierre de minas, el desarrollo del terreno debe adaptarse a las necesidades locales, así como a los puntos fuertes y débiles del lugar. En este sentido, la comunicación continua con todas las partes interesadas y con el público es un elemento vital y decisivo para que la conversión tenga éxito. Para ello, se debe hacer especial hincapié en procurar una información completa y crear transparencia. Las herramientas y la información necesarias para lograr esto las proporcionan la vigilancia y la gestión del conocimiento. Ambos componentes son, además de indispensables, la base para garantizar un sistema de gestión de riesgos de minas antiguas duradero.

3.4 Tema «vigilancia y gestión de riesgos»

3.4.1 Vigilancia

Los procesos mineros suelen afectar a áreas extensas. En cuanto al seguimiento, interesan principalmente los procedimientos cuyo potencial reside en la observación de grandes áreas (Goerke-Mallet et al. 2016b). A este respecto, es de gran interés el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea, Copernicus, cuyo segmento espacial consiste en una serie de satélites denominados «*Sentinel*» (centinelas). Estos satélites llevan a bordo sensores tanto de radar como multiespectrales y orbitan la Tierra con una frecuencia de 6 días. Los datos proporcionados de manera gratuita por el programa Copernicus poseen, en gran medida, una alta resolución territorial y temporal.

Dentro de un proyecto de investigación, el FZN está investigando junto con antiguas empresas mineras del carbón de la región del Ruhr la posibilidad de la vigilancia innovadora de los legados mineros a cielo abierto y cercanos a la superficie. El objetivo es establecer un sistema de alerta temprana que se centre en los movimientos del suelo, los cambios en el contenido de agua del suelo y la vegetación, así como los cambios en el uso del suelo. En el caso de detectar cambios, se prevé el uso de otros métodos de control, que pueden ser por satélite, así como aéreos y terrestres (Goerke-Mallet et al. 2017).

3.4.2 Gestión del conocimiento

El FZN se define como una entidad central de gestión y transferencia de conocimientos sobre todas las cuestiones y descubrimientos relacionados con la minería tradicional y la posminería y, en definitiva, con todo el ciclo de vida de la minería. Por ello, se hace necesario la creación de una base de datos bibliográfica detallada. Además, el FZN está trabajando en una base de datos de conocimientos con una referencia espacial y temporal. A toda la información factual se le asigna un sistema de referencia 4D, de modo que, además de una búsqueda de texto simple, también es posible buscar por lugar y tiempo.

Por un lado, la gestión del conocimiento está orientada a analizar y comprender los procesos pasados. Por otro lado, proporciona la base para tomar futuras decisiones trascendentes y, si es necesario, de manera rápida. Las bases de datos deberían favorecer la disponibilidad de la información almacenada con el fin de servir de apoyo para las valoraciones y decisiones de los expertos.

Los trabajos de investigación que tratan este tema están realizando diferentes actividades, como la prueba de sistemas DY adecuados, el almacenamiento de una amplia gama de información y la disponibilidad de acceso a conocimiento en minería. Un ejemplo de ello es el glosario Bergmännische Wasserwirtschaft (gestión del agua en las minas), de reciente publicación, en cuya elaboración ha participado en gran medida el FZN (Burghardt et al. 2017).

3.4.3 Gestión de riesgos

Sin embargo, el control sostenible y la prevención de riesgos y peligros derivados de la actividad minera contrastan con las oportunidades de futuro. Cada vez se plantean más cuestiones sobre temas como el uso de los enormes terrenos mineros para la obtención de energía renovable, la construcción de nuevos asentamientos para la creación de puestos de trabajo (estructuras económicas), así como para fomentar la cultura y el ocio. La gestión de riesgos se encarga de la descripción cualificada de los riesgos y la formulación de oportunidades.

Tabla 2: Resumen de los riesgos y oportunidades relacionados con los elementos de la posminería.

Elemento	Riesgo	Oportunidad
Labores mineras cercanas a la superficie, bocaminas; pozos	Seguridad, Daños	Producción de metano, Planta de almacenamiento por bombeo, almacenamiento de calor Parque geológico
Subsidencias mineras,	Saturación hídrica,	Mejora ecológica mediante humedales
Levantamientos	Daños	
Superficie del terreno	Daños	
Fuga de grisú a la superficie	Seguridad	Uso del metano
Pólder	Bombeo permanente	Humedales
Drenaje del agua de la mina	Bombeo permanente	Obtención de calor
Escombreras	Estabilidad	Centrales eólicas, Uso recreativo, naturaleza
Áreas mineras	Contaminación del suelo	Desarrollo comercial, vivienda, cultura, etc.

La tabla 2 ofrece un resumen de los elementos individuales que deben ser considerados, así como de sus riesgos y oportunidades. La tarea consiste en prevenir o minimizar los riesgos probables y ofrecer un valor añadido para las regiones afectadas y su población, mirando por las oportunidades para el futuro. Esto solo puede lograrse esencialmente si se dispone de información sobre todo el ciclo de vida de la minería y esta se incorpora a la evaluación de riesgos y oportunidades con conocimientos técnicos.

4 Formación

4.1 Formación de expertos en posminería

Cuando la industria del carbón de Renania del Norte-Westfalia entra por fin en la fase de posminería, la THGA de Bochum, como antigua «Escuela de Minas de Bochum», tiene un papel especial que desempeñar. Después de más de 200 años de formación de «jóvenes mineros», ahora se busca formar a los expertos en las tareas posmineras.

Significa un gran gesto por parte de la Fundación RAG la dotación económica que realizó para la investigación en posminería, al igual que creó y dio continuidad al máster de «Geoingeniería y Posminería» en 2012. El máster fue acreditado ese mismo año y se puso en marcha el semestre de verano de 2013, contando actualmente con unos 75 estudiantes matriculados. Los primeros veinte egresados del máster ya han completado con éxito su formación. La duración de los estudios es de seis semestres. El máster consecutivo se basa en los títulos de «Geotecnia y Geología Aplicada», «Ingeniería de Materias Primas» y «Medición» de la THGA. Además, se admiten egresados que provengan de áreas temáticas afines. Los estudios concluyen con la finalización del máster (M.Eng.). Esto proporciona a los egresados la cualificación básica para los estudios de doctorado.

La demanda de personal cualificado es ya elevada y aumentará considerablemente en los próximos años. Por lo tanto, los graduados tienen un abanico de posibles salidas laborales en organismos oficiales (dirección de minas, oficinas de regulación de la construcción, oficinas de medioambiente), empresas mineras y sus unidades de postratamiento, empresas dentro de la ingeniería civil especial, de cimientos y de tierra, así como en las empresas de perforación y construcción de túneles. Este amplio abanico laboral, de naturaleza práctica, no se limita a la posminería. Los estudios proporcionan al estudiante las competencias necesarias para trabajar en proyectos de la categoría geotécnica GK3 según el Eurocódigo 7.

4.2 Requisitos para las regiones

Los esfuerzos de aquellos implicados en la resolución de los retos de la minería antigua y la posminería deben dirigirse a mantener habitables las antiguas regiones mineras. Para el desarrollo del potencial de las regiones se requiere un amplio apoyo, así como los riesgos existentes deben ser abordados y tratados de forma transparente y comprensible. Muchas regiones mineras llevan años en un proceso de cambio que continuará en el futuro. El éxito de este proceso requiere una estrecha colaboración entre todos los «responsables» y una comunicación honesta.

Según el FZN de la Cuenca del Ruhr, tanto las antiguas empresas de la industria alemana del carbón como las autoridades mineras (Gobierno del Distrito de Arnsberg, Departamento 6, Minería y Energía en NRW) están dispuestos a contribuir con su experiencia al proceso de cambio. Esto también se aplica a las universidades y escuelas técnicas, que apoyan el cambio estructural en la región, por un lado, formando a personal cualificado y, por otro, realizando investigaciones orientadas a la práctica. Además, la Fundación RAG se ha propuesto como tarea principal promover la educación, la ciencia y la cultura en la cuenca minera con sus recursos financieros.

Referencias

- Arbeitskreis „4.6“ der DGGT und des DMV (2017): Empfehlung „Wasserführende Stollen. Erkundung - Bewertung - Sanierung“. - In: Meier, G., Benndorf, J., Löbel, K.-H., Butscher, C., Tondera, D & Busch, W. (Hrsg.): Tagungsband des 17. Altbergbau-Kolloquium, TU Bergakademie Freiberg, 19 S., 1 Tab.
- Bezirksregierung Arnsberg & THGA (Hrsg.) (2017): NACHBergbauzeit NRW. Beiträge 2011, 2013, 2015. - Veröffentlichung aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum, 217: 196 S., zahlr. Abb. und Tab.; Bochum.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2018): Bergbau und Nachhaltigkeit. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Bergbau_Nachhaltigkeit/bergbau_nachhaltigkeit_node.html (visitado por última vez el 07/08/2018).
- BBodSchG - Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten "Bundes-Bodenschutzgesetz" vom 17. März 1998 (BGBl. 1 S. 502), zuletzt geändert durch Artikel 3 Absatz 3 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. 1, S. 3465).
- Burghardt, D., Coldewey, W.G. (Hrsg.), Melchers, C., Meßer, J., Paul, M., Walter, T., Wesche, O., Westermann, S., Wieber, G., Wisotzky, F. & Wolkersdorfer, C. (2017): Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft. - 1. Aufl., Veröffentlichung des Arbeitskreis Grubenwasser der Fachsektion Hydrogeologie e.V. in der DGGV e.V. (FH-DGGV), 79 S.; Neustadt/Wstr.
- Drobniewski, M. (2018): Planung und Umsetzung des Grubenwasserkonzepts der RAG Aktiengesellschaft. In: Gerschel, H. & Wrede, V. (Hrsg.): Schicht im Schacht? Der Steinkohlenbergbau an der Ruhr. Tagungspublikation zum 43. Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgen der Deutschen Geologischen Gesellschaft - Geologische Vereinigung. 16. - 18. März 2018 in Witten/Ruhrgebiet. - Duderstadt, Mecke Druck und Verlag, S. 67-72 (EDGG 259).
- EGLV, Emschergenossenschaft (Hrsg., 2013) Fließgewässer im Emscherraum - Biologie, Beschaffenheit, Bachsysteme. - Eigenverlag, 70 S., Essen.

- Goerke-Mallet, P.; Melchers, C. & Paschedag, U. (2016a): Das Forschungszentrum Nachbergbau an der THGA Bochum. - Bergbau 67 (10), S. 465-467.
- Goerke-Mallet, P.; Melchers, C. & Mütterthies, A. (2016b): Innovative monitoring measures in the phase of post-mining. - In: Drebenstedt, C. & Paul, M. (Eds.): Mining meets water - conflicts and solutions. Proceedings. IMWA 2016 in Leipzig, Germany, July 11-15, 2016. 1. Auflage. - Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, Institute of Mining and Special Civil Engineering, S. 570-577.
- Goerke-Mallet, P.; Pakzad, K.; Cavdar, N.; Melchers, C.; Mütterthies, A. & Perlt, J. (2017): Innovative Monitoring-Verfahren im Nachbergbau: Überblick, Potentiale, Erfahrungen. - Markscheidewesen 124 (2), S. 32-39.
- Goerke-Mallet, P.; Kirchner, M. & Daniels, A. (2018): Neue Technologien, neue Lagerstätten, neue Perspektiven? Rohstoffwirtschaftliche und rechtliche Überlegungen. Mining Report Glückauf 154 (3), S. 234-244.
- Harnischmacher, S. (2010): Quantification of mining subsidence in the Ruhr District (Germany). - Géomorphologie 3, S. 261-274.
- LINEG, Linksniederrheinische Entwässerungs-Genossenschaft (2016): LINEG 2015 Natürlich Niederrhein. - Jahresbericht 2015. Kamp-Lintfort Selbstverlag. URL: <https://www.lineg.de/service/broschüren/> (visitado por última vez el 29/08/2018).
- Melchers, C. & Dogan, T. (2014): Studie zu erfolgten Grubenflutungen in Steinkohlenrevieren Deutschlands und Europas. In: Meier, G.; Sroka, A.; Löbel, K.-H.; Klapperich, H.; Tondera, D. & Busch, W. (Hrsg.): 14. Altbergbau-Kolloquium. 06. bis 08. November 2014, Gelsenkirchen. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 300-305.
- Melchers, C.; Goerke-Mallet, P. & Kleineberg, K. (2016): Elements and aspects of the post-mining era. - Mining report 151 (6), S. 212-227.
- Melchers, C., Goerke-Mallet, P. (2018): Nachbergbau im Ruhrrevier: Aufgaben und Perspektiven. - Schicht im Schacht? Der Steinkohlenbergbau an der Ruhr. Tagungspublikation zum 43. Treffen des Arbeitskreises Bergbaufolgen der Deutschen Geologischen Gesellschaft - Geologische Vereinigung. 16. - 18. März 2018 in Witten/Ruhrgebiet. Duderstadt: Mecke Druck und Verlag, S. 81-90 (EDGG 259).
- Mining.com Newsletter, 22.5.2018: Blockchain will completely revolutionize how we mine gold and precious metals. Frank Holmes - U.S. Global Investors. URL: <http://www.mining.com/web/blockchain-will-completely-revolutionize-mine-gold-precious-metals/> (visitado por última vez el 30/08/2018).
- Pakzad, K., Mütterthies, A., Goerke-Mallet, P., Melchers, C., Yang, C.-H., Soergel, U. (2018): Monitoring wasserhaushaltsrelevanter Prozesse im Bergbau mittels Fernerkundung/Copernicus. 19. Geokinematischer Tag. Freiberg, S. 44-52.

Westermann, S.; Dogan, T.; Reker, B.; Goerke-Mallet, P.; Wolkersdorfer, C. & Melchers, C. (2017): Evaluation of mine water rebound processes in European coal mine districts to enhance the understanding of hydraulic, hydro chemical and geomechanical processes. - In: Wolkersdorfer, C.; Sartz, L.; Sillanpää, M. & Häkkinen, A. (Eds.): Proceedings 13th International Mine Water Association Congress - Mine water & circular economy. Lappeenranta, Finland, June 25-30, 2017. Lappeenranta: LUT Scientific and Expertise Publications, Vol. 1, S. 147-154 (LUT Scientific and Expertise Publications: research reports 63).

Publicado por primera vez en: Meier, G.; Benndorf, J.; Löbel, K.-H.; Butscher, C.; Tondera, D.; Busch, W.; Dziurzynski, W.; Sroka, A. (Hrsg.): 18. Altbergbau-Kolloquium. 8. bis 10. November 2018, IMG PAN, Bergwerk Wieliczka. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 266-279.

Investigación posminera sobre reactivación y transición

Kai van de Loo, Jürgen Brüggemann

Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Resumen

El Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN por sus siglas en alemán) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA por sus siglas en alemán) de Bochum (Alemania) ha abierto ampliamente el abanico de su programa de investigación desde 2019/2020 gracias a la nueva división de investigación «Reactivación y Transición». La investigación de esta área se centra en el desarrollo urbanístico, la política local, los aspectos socioeconómicos y la gobernanza de la fase tras el cierre de minas. Así, se pone menor énfasis en las ciencias naturales o las geociencias y más en la economía, la geografía, la planificación territorial y cuestiones políticas relacionadas con la «posminera¹», aunque el trabajo en el centro de investigación está relacionado con todos estos a nivel interdisciplinar. En esta línea, el presente artículo ofrece una visión del trabajo que se está llevando a cabo en esta división de investigación y hacia dónde se podría dirigir su investigación próximamente.

1 Introducción

En 2018 finalizó la minería de carbón en Alemania. Mientras el desarrollo posminero comenzaba en el sur del Vallé del Ruhr ya por los años 70 del siglo XX con el cierre de la última mina de esta zona, toda la región se ha ido concienciando respecto a la posminería. Cabría así centrarse inicialmente en las tareas permanentes de la gestión del agua del sector (retención de agua minera, medidas para los pólders, purificación de aguas subterráneas...) y sus retos geocientíficos. Además, se requeriría de una buena gestión de los legados físicos, ecológicos y socioeconómicos de la discontinua minería del carbón y soporte para seguir la transición de (ahora antiguas) regiones de carbón a lo largo de los ríos Ruhr y Saar y de Ibbenbüren. Las decisiones políticas de 2020 de dejar de producir energía del carbón en Alemania antes de 2038 también conllevaron el fin de las minas de lignito a nivel nacional, lo que implicó poner la cuestión posminera sobre la mesa también en estas regiones. Teniendo en cuenta que toda la minería tiene su fin

¹ N. de T.: Se utilizan los términos «posminero», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

(como se ha demostrado en Alemania en el pasado en cuanto, por ejemplo, la extracción de mineral de hierro en el oeste o de mineral de uranio en el este), esta industria debe enfrentarse siempre en algún momento y a lo largo de todo el mundo a una transición posminera y hacer frente a problemas específicos, que dependerán de la gravedad de cada situación según cada circunstancia.

Conscientes de este hecho inevitable, la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) de Bochum (Alemania), ha puesto foco en este campo al ofrecer una línea específica de estudios sobre posminería desde 2012. El Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN por sus siglas en alemán), creado en 2015, es la primera institución de Alemania que se ha centrado explícitamente en cuestiones posmineras, incluida la restauración y posterior uso de las zonas recuperadas y el camino hacia la transición a estructuras posmineras. Todo empezó con la donación de la dirección y la acreditación del máster profesional «Geoingeniería y Posminería», y se ha ido avanzando desde entonces.

En 2019 y 2020 la gama de actividades de investigación en el FZN se amplió: partiendo de su único pilar de investigación sobre tareas permanentes de la minería, se dio cabida a tres divisiones de investigación más, entre ellas la división de Reactivación y Transición, que a continuación se detalla.

2 Principios y estructura de investigación del FZN

Actualmente, el FZN es una institución científica y de transmisión de conocimiento independiente con reconocimiento a nivel nacional e internacional.

El trabajo del FZN gira en torno a la investigación para controlar a nivel sostenible el impacto del cierre de minas y la conversión de antiguas minas y sus infraestructuras en instalaciones con un uso de valor en el futuro. Asimismo, se está incrementando la investigación sobre cuestiones técnicas, aspectos socioeconómicos y la política estructural de la reactivación y transición.

Aun así, la base principal a nivel científico para lidiar con los retos que supone el cierre de minas y las actividades derivadas de ello no se ha desarrollado sistémicamente todavía, y los diferentes actores siguen teniendo que construir una red adecuada. Ante estas condiciones básicas, se deben iniciar procesos de innovación dirigidos a los agentes de la sociedad, las empresas y la administración pública. El FZN también está asumiendo estas tareas, buscando convertirse en un «compañero» competente para todos los sectores de la posminería a nivel (inter)nacional a través de la agrupación y la integración de varias carreras de conocimientos técnicos y competencias profesionales. Con estos objetivos, el FZN promueve, a su vez, un suministro responsable y sostenible de materias primas para la sociedad en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (1), anticipándose al fin de la minería y a las cargas que surgirían por su terminación.

Siguiendo el aumento de sus campos de investigación, el FZN tiene ahora cuatro divisiones de investigación activas:

- Gestión de tareas permanentes y aguas de minas: el FZN busca soluciones para tareas permanentes basadas en descubrimientos de la geociencia.
- Geomonitordeo de áreas mineras y posmineras (particularmente para la protección de la superficie).
- Ciencias materiales para la preservación y reutilización de la herencia industrial con el Centro de Conservación del Patrimonio del Ruhr (Heritage Conservation Center Ruhr), que se lleva a cabo con el Museo Alemán de la Minería.
- Reactivación y transición: el FZN da soporte e investiga la transición de emplazamientos y regiones mineras y vincula la política regional y de desarrollo urbanístico con aspectos socioeconómicos y cuestiones gubernamentales.

La facilitación del discurso científico-social entre las empresas, autoridades y agentes sociales, la creación de transparencia y la promoción de la aceptación social constituyen otros grandes temas de trabajo del FZN.



Figura 1: Resumen de las prioridades de investigación en el FZN.

3 Investigación sobre política regional y desarrollo urbanístico

Esta área de investigación se centra en las condiciones del marco político regional y estructural y en las circunstancias económicas y sociales de la posminería en regiones específicas. Se deben promover propuestas específicamente dirigidas a seguir desarrollando las ayudas regionales o el uso de los terrenos y profundizar en los conceptos de su uso posterior si se quiere alcanzar los resultados deseados. Estos son los prerequisites básicos para asegurar la participación y la conexión entre los agentes relevantes del discurso regional. Las condiciones económicas y sociales a nivel nacional y europeo de la política regional de apoyo a la posminería en regiones posmineras constituyen una parte principal de la iniciativa actualmente en marcha Regiones del Carbón en Transición

de la UE. Esta se ha ido expandiendo para incluir regiones intensivas en carbono y se ha integrado en el nuevo Mecanismo para una Transición Justa de la política climática de la UE.

Otro aspecto que se investiga en esta división es la evaluación y el desarrollo de los sistemas de seguimiento económico regionales para antiguas regiones mineras. Para ello, se debe analizar y estructurar la experiencia disponible sobre procesos de planificación integrados que recojan tanto los intereses de los propietarios (lo privado) y los procesos de las autoridades públicas (lo público). Una transformación con éxito de las antiguas minas en propiedades para el mercado inmobiliario requiere activar la gestión del sector inmobiliario por parte de los propietarios de los terrenos, que deberían apoyar el negocio minero. Asimismo, se deberían identificar científicamente enfoques similares a nivel europeo.

El FZN tiene acceso a información sobre las medidas tomadas en las zonas del Ruhr y del Sarre y puede usarse como base para el desarrollo de best-practices en otras regiones (2). La experiencia de los últimos 30 años muestra cómo estos conceptos deben adaptarse a la situación política, social y económica de las regiones y los municipios. Como ejemplos de esta experiencia adquirida pueden tomarse los años de soporte a la Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) para el desarrollo regional y local en las regiones de lignito del este de Alemania en los años 90 del siglo XX, así como varios proyectos de investigación europeos o la asistencia para el cambio estructural en la región polaca minera del alrededor de Katowice que se inició desde el gobierno estatal de Renania del Norte-Westfalia. La experiencia adquirida por las medidas posmineras en regiones de la hulla supondrá un útil punto de partida en el futuro para la transición de las áreas mineras de lignito y para establecer un enfoque de investigación sólido para estas acciones, siempre y cuando se dé una cooperación entre los diferentes agentes de la sociedad (científicos, políticos, de la administración pública y del público general).

Entre otras, las iniciativas de investigación se están llevando a cabo para determinar cómo se pueden identificar los proyectos especialmente relevantes para dar forma al periodo tras el cierre de la mina. Los actores pertinentes podrían así acceder a un conjunto de conocimientos que podrían usarse para revisar y poner en marcha puntos de vista, estrategias y conceptos que responderían a intereses regionales específicos, apoyando la planificación, las tomas de decisiones y los logros a cumplir en el futuro. La capacidad para implementar se generará en base a las opciones de actuación que podrán y deberán servir en el futuro éxito potencial como prioridad. Esto tendrá que ir acompañado de una actualización continua y una transferibilidad a escala nacional e internacional.

No resulta, por supuesto, sencillo describir y medir el potencial éxito de las posibles acciones del proceso de cambio en regiones mineras con probabilidad exacta o siguiendo un perfil de riesgo absoluto. Por esto, sería útil que se determinasen e implementasen de forma organizada los conocimientos de gestión y de las redes que generarían datos, hechos, métodos y procesos y que se pondrían a disposición de los actores regionales. Estos tipos de estructuras podrían (entre otras cosas) establecer puntos de

partida orientados a soluciones, especialmente para superar los actuales y futuros retos derivados de la transición energética para la transformación estructural del este y el oeste de las regiones alemanas y europeas de minería y posminería del carbón. La transformación estructural, principalmente de regiones de carbón, también será supervisada y analizada por si fuese posible adaptarla a otras partes del mundo, pudiendo obtenerse conocimientos constructivos sobre las oportunidades y retos en el diseño de medidas posmineras.

4 Investigación sobre aspectos socioeconómicos

El cierre de minas y la resultante transición y continuación de procesos posmineros afecta inevitablemente al desarrollo socioeconómico de las regiones impactadas. Siempre y cuando sea posible, deben crearse nuevos empleos, buscarse nuevos usos para antiguas minas y priorizarse y estructurarse una transformación lo más equitativa posible de cada región de forma que no se produzca un declive y deterioro local. La brillante experiencia del Valle del Ruhr en las últimas décadas da una gran cantidad de material ilustrativo que, si se compara a nivel internacional (especialmente con los numerosos ejemplos negativos de otras localidades y áreas mineras del mundo en desuso), sería el rumbo a seguir a nivel mundial para otras regiones posmineras (3).

Tal y como indica Kretschmann (4), en el área de investigación de reactivación y transición, los efectos del uso posterior de las minas deberían investigarse y evaluarse en base a aspectos socioeconómicos. Se estaban realizando entonces encuestas y evaluaciones económicas regionales e internacionales sobre varias minas cerradas, y la base para valorar medidas para las regiones afectadas serían los estudios de caso sobre el vínculo entre el cierre, la posminería y el cambio estructural. El foco se ponía así en antiguas zonas de minas de carbón (particularmente del Valle del Ruhr), los motores y procesos de transformación estructural y los factores de éxito de planificación estructural y regional.

Se partiría entonces del seguimiento local y regional, de análisis DAFO (debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades) de desarrollo socioeconómico y de estudios comparativos de procesos similares de cambio y transformación en otros sectores industriales. Además, el propio mercado y el potencial innovador del sector posminero deberían analizarse en aras de medir su contribución activa al cambio estructural y para ayudar a las empresas en el desarrollo y el marketing de sus productos y servicios, así como a aumentar su conocimiento del sector posminero y de reactivación (5).

Desarrollar activamente una antigua región minera a largo plazo y ayudarla a tener una prosperidad duradera demanda una transformación sostenible. Dicho de otra manera, se necesitan procesos que, siguiendo a Kretschmann, busquen la mejora a largo plazo de las capacidades económicas, ecológicas y sociales y que contemplen las futuras consecuencias (riesgos y oportunidades derivados de la planificación y las acciones del «hoy»). ¿Y por qué es importante la transformación sostenible para las regiones mineras? Porque la decisión de desinvertir y cerrar una mina puede que no requiera más de

una reunión (de las personas que toman decisiones). Sin embargo, los efectos de la decisión sobre la región minera perdurarán por lo menos una generación. Por lo tanto, la gestión de riesgos ha de buscar minimizar las consecuencias de desinvertir y explotar el potencial resultante. (6)

Las actuales decisiones sobre la política climática y energética de Alemania y la UE buscaban acelerar la descarbonización del sistema energético y, en última instancia, alcanzar una neutralidad climática en 2050. Básicamente se pretendía pasar de una producción energética convencional que se ha basado en el uso de fuentes de energía fósiles (principalmente petróleo y gas, que siguen siendo la fuente de un 80% de esta energía) a un uso de energías renovables, una mayor eficiencia y uso energéticos a través del uso de electricidad verde o ecológica (una transición energética). De hecho, estos últimos constituyen ejemplos significativos de esta transformación sostenible.

Estas decisiones han ido y siguen resultando en varias, en ocasiones sorprendentes, oportunidades productivas para las regiones de antiguas minas de carbón y para las empresas de la industria del carbón que fueron altamente impactadas por la simultánea salida del carbón y terminación de su minería. Estas incluyen: la generación de electricidad a partir del gas de minas (respaldado por la Ley de Energías Renovables); la generación de energía geotérmica a partir de pozos verticales (infraestructuras de las minas), especialmente la extracción de calor de aguas mineras para el suministro de calor para edificios y otros usos; la implementación de plantas de energía eólica en escombreras (especialmente efectivas en la costa para energía eólica por su altura y accesibilidad al viento) y plantas fotovoltaicas en espacios abiertos y tejados de edificios en antiguos sitios mineros o en las laderas de pozos mineros; la producción de biomasa en antiguas mine premises o de la instalación de centrales de acumulación por bombeo subterráneas, siendo estas últimas técnicamente posibles, pero no económicamente en Alemania por la situación actual. (7)

Al mismo tiempo, estos ejemplos muestran la fuerte relación entre la minería del poscarbón y del pasado, presente y futuro del abastecimiento energético y las decisiones marco de la política energética que definen esta relación. El área de investigación de Reactivación y Transición continuará siguiendo de cerca estas decisiones y sus consecuencias regionales. (8)

Los proyectos de transición energética mencionados representan también oportunidades substanciales para nuevos empleos y mayor valor para las regiones posmineras, aunque no se sepa la medida en que serán adecuadas para compensar realmente o en exceso la pérdida de la minería como factor económico y de empleo regional. En cualquier caso, la creación de nuevas capacidades de producción y empleos adecuados, no solo en el sector de la energía, constituye un reto absolutamente clave y continuo para las regiones mineras y posmineras en declive económico, convirtiéndolo así en uno de los mayores puntos de interés de esta división de investigación. (9)

5 Investigación sobre la gobernanza

El control y la regulación político-sociales (gobernanza) de la transformación estructural de la minería a la posminería y de su desarrollo posterior constituye otro tema clave de investigación. Resulta casi imposible separar este del resto de temáticas de investigación presentadas en este artículo teniendo en cuenta el vínculo con la posminería de temas como la política regional, la política energética o la política de empleo. Además, hay problemas a diferentes niveles en la práctica de la gobernanza y múltiples dimensiones de la aspiración a de llevar a cabo una gobernanza buena y sostenible, tal y como se muestra en el Sustainable Governance Indicators (que incluye un listado de indicadores sobre gobernanza sostenible) de la Fundación Bertelsmann. (10) La ordenación del territorio es una herramienta indispensable para el equilibrio de intereses de los involucrados, quienes deben desarrollar una estrategia común a partir de modelos de gobernanza con miras a futuro. (11)



Figura 2: Informe del Banco Mundial para la Conferencia Mundial sobre el Clima en Katowice, diciembre 2018 (Banco Mundial).

La importancia de la gobernanza no puede subestimarse en a estos aspectos al consti- tuir la «ingeniería social» del cierre de las minas de carbón. Todas estas cuestiones están recogidas en el informe del Banco Mundial *La gestión del cierre de las minas de carbón: Lograr una transición justa para todos de finales de 2018* y presentado durante la Conferencia Mundial sobre el Clima en Katowice (Figura 2), que recogía el conjunto de experiencia internacional sobre este tema. El Banco Mundial está apostando por en este campo al igual que por otros importantes estudios científicos como el de Bainton/Hol- combe del Centro para Responsabilidad Social en Minería del Instituto de Minerales Sos-

tenibles (SMI por sus siglas en inglés) de la Universidad de Queensland (Australia) (Figura 3) sobre los aspectos sociales y económicos del cierre de minas de carbón. Otros ejemplos serían la experiencia a nivel nacional con la tolerancia social de la terminación de minas de carbón y los proyectos de terminación de la minería del lignito en Alemania. Un análisis más profundo muestra a su vez que todavía existen numerosas y grandes diferencias en investigación sobre las que se deben trabajar y, por ello, esta área de investigación se centra en estas. (12)

Hallazgos de Bainton/Holcombe (SMI Universidad de Queensland) sobre las preguntas abiertas sobre los aspectos sociales del cierre de las minas (2018)

6 principales lagunas de conocimientos:

- Inexistencia de resumen de las **diversas dimensiones económicas de sitios contaminados** tras el cierre de minas.
- Falta de evidencia sobre la naturaleza, alcance e impacto de **medidas políticas y regulatorias** para medidas sociales que acompañen los cierres en comparativas internacionales.
- Falta de pruebas sobre la naturaleza, alcance e **impacto del acuerdo de los grupos de interés** en los cierres de minas.
- Falta de **guías para el compromiso de los stakeholders** (especialmente la comunidad minera) completas y coherentes con respecto a cierres aceptables a nivel social y regional.
- Inadecuación de estudios comparativos sobre **las experiencias/lecciones de otras industrias** u otros sectores sobre los aspectos sociales de cierres.
- Falta de **estudios de caso sobre procesos de transición tras el cierre y sobre futuros desarrollos socioeconómicos en el sector posminero.**

Figura 3: Hallazgos de Bainton/Holcombe sobre cuestiones abiertas para la investigación respecto a *The Social Aspects of Mine Closures (los aspectos sociales del cierre de las minas (2018))* (SMI).

La gobernanza también es un tema concreto de investigación de un proyecto que se está llevando a cabo en el FZN para la Asociación Regional del Ruhr (en adelante RVR por sus siglas en alemán) sobre el acuerdo de regiones mineras del Estado Renania del Norte-Westfalia, RAG Aktiengesellschaft, la RVR y las localidades del Valle del Ruhr.

El acuerdo de regiones mineras para revitalizar proactivamente los principales sitios mineros buscaba contribuir de forma concreta a la transformación exitosa la antigua regiones mineras y se cerró entre estos grupos de interés en 2014 (Figura 4). El modelo de cooperación, coordinación de públicos y de acción público-privada para el desarrollo de localidades posmineras en la metrópolis del Ruhr y en la región del carbón Ibbenbüren se ha seguido rigurosamente (13). El grupo de trabajo intermunicipal Transformation as an Opportunity («transformación como oportunidad» en español) y, particularmente, el acuerdo de regiones mineras recibe constantemente consultas de alto nivel y europeas (14). El compartir la experiencia que se tiene está relacionado íntimamente con el acuerdo en línea con la promoción de actuar de forma conjunta, la orientación estratégica hacia la cooperación y los pasos que se han seguido su implementación. La cooperación entre el Estado de Renania del Norte-Westfalia, la RVR, las localidades afectadas y RAG, como propietario de las antiguas localidades mineras, ha llevado a una

transparencia y una solidaridad que han permitido la resolución de cuestiones complejas colaborativamente. Se ha trabajado conjuntamente en veinte sitios de desarrollo siguiendo esta coordinación regional desde 2014, y estos se han ido desarrollando con éxito como operaciones locales. En esta línea, tanto el acuerdo de regiones mineras como los proyectos particulares se han ido presentando y tratando como proyectos de mejores prácticas en la plataforma de la UE Regiones del Carbón en Transición en Bruselas.



Figura 4: Acuerdo de regiones mineras (RVR).

6 Líneas de futuro en el área de investigación de Reactivación y Transición en el FZN

La división de Reactivación y Transición se centrará a futuro del girará en cuatro niveles:

- A nivel internacional, se involucrará en sus áreas de especialización con los diferentes contactos internacionales del FZN, de China, Estados Unidos y Australia, entre otros. Asimismo, se está valorando un catálogo de proyectos internacionales sobre posminería y varios planes a lo largo del mundo sobre la reutilización de minas cerradas (aunque sigue en revisión). También se han abierto debates preliminares (por ahora) sobre un posible compromiso del Banco Mundial para esclarecer el camino a seguir por Alemania para dejar la minería del carbón de una manera ordenada y socialmente viable. Esto incluiría disposiciones para la posminería, y serviría para comparaciones internacionales y compartir experiencias. Ucrania, los países del Oeste de los Balcanes y otros Estados se han mostrado particularmente interesados por esto.

- A nivel europeo, esta división de investigación seguirá participando activamente en la iniciativa de la Unión Europea para regiones del carbón en transición y regiones intensivas en carbono, que ya ha dado lugar a una plataforma de información y diálogo dentro y fuera de la Unión Europea para la transformación estructural de regiones de carbón y regiones con una intensiva producción de CO₂ (industria pesada, esquisto bituminoso y extracción de turba), alejándose de sectores del carbón y otros sectores con una gran huella de carbono. El objetivo es avanzar en el futuro en cuanto a políticas estructurales en el marco del Pacto Verde Europeo y su Fondo de Transición Justa. Esta iniciativa aporta, por un lado, un conjunto de estudios, presentaciones, herramientas o materiales sobre la reactivación y transición, aunque aún se requiere que pasen por una reflexión y análisis científicos e imparciales (15). Por otro lado, esta ofrece diferentes oportunidades para participar en nuevos proyectos científicos financiados por la UE (16).
- A nivel nacional, la salida planificada del carbón en Alemania constituirá uno de los focos de interés investigador y se dará especial atención a la experiencia y el conocimiento adquiridos durante la terminación de la minería nacional de carbón y su transformación a procesos posmineros. Otro tema de investigación para esta división será la integración de la posminería (que sigue sin ser adecuada hoy por hoy) en la nueva estrategia de materias primas adoptada por el Gobierno a principios de 2020. En efecto, aunque se habla de «cierres de minas sostenibles», no se habla de «posminería» explícitamente. Toda estrategia de materias primas que busque ser sostenible deberá tener en cuenta la posminería desde el principio y priorizar su integración de forma proporcional a su importancia. Al mismo tiempo, la posminería generará materias primas nuevas o adicionales para el futuro (es decir, materias primas energéticas como el gas de mina o calor del pozo) o recursos biológicos, como las planificadas para el área minera de lignito. Mientras, la conversión sostenible de regiones de carbón genera otra demanda solo a nivel de infraestructuras para las conocidas como futuras materias primas (como tierras raras) y para las materias primas de construcción tradicionales (17).
- Finalmente, el área de Reactivación y Transición participará activamente en el debate de especialistas sobre una transformación estructural y que vele por el futuro económico y social de las antiguas regiones de minas de carbón de Alemania, especialmente en el Valle del Ruhr, a nivel regional. El proyecto de investigación sobre el acuerdo de regiones mineras, por ejemplo, sienta las bases para un enfoque más profundo y extensivo. La posminería está, por naturaleza, vinculada a su localización al igual que la previa explotación minera, de forma que el bienestar y malestar económico-sociales de sus regiones son de gran importancia. El peso de estas cuestiones para el Valle del Ruhr y el Sarre se subraya desde la perspectiva, y como parte del compromiso, de la posminería del estudio publicado en 2016 por la Fundación RAG sobre el futuro. Se hablaba así de una década fatídica para el Valle del Ruhr en particular, en el que el cambio de rumbo debería producirse durante la década de 2020 para que la región no se quedase atrás en el marco del desarrollo económico (18). La Conferencia de Ruhr, que se organizó desde el gobierno de Renania Norte-Westfalia para alinear la finalización de la minería del carbón en 2018, buscaba poner

en marcha este cambio de rumbo. De hecho, esta conferencia ha dado pie a 73 proyectos individuales en cinco campos de acción definidos que ofrecen, asimismo, toda una serie de puntos de partida para el trabajo de áreas de investigación, como el proyecto de transformación metropolitana inteligente llevado a cabo por la Ruhr Academy (centro universitario de investigación) (19). Desde el *Initiativkreis Ruhr 2020* también se trabajó y profundizó en interesantes ideas para el salto a un futuro exitoso de la región (20), cuestión que debería y habrá de debatirse en mayor detalle (tarea que contempla esta división de investigación). La experiencia práctica de la RVR por el cambio estructural del Valle del Ruhr ha demostrado, no obstante, que esto requiere de aguante y que no hay soluciones patentadas (Figura 5). En muchos casos, resultará casi imposible reciclar los legados materiales de unas industrias del carbón y del acero cerradas para obtener productos comerciales en el mismo volumen en que se obtenían al tratarse de unas industrias que constituían una parte vital de la vida de la vida en comunidad en menos de 15 o 30 años, aunque pueda haber excepciones para esta regla.



Experiencia práctica del cambio estructural en la región del Ruhr

Extracto de una presentación internacional del RVR en marzo de 2019 en Zollverein:

RUHR | Lessons learned

The experience of the RUHR is the longterm story of CHANGE.

Lesson learned: *It takes up to 15 - 30 years to bring big old industrial sites back to the city and back to the market.*

Solutions have to be: tailor-made

Conclusiones también para el desarrollo socioeconómico de la minería posminera:

- El éxito del cambio estructural requiere un largo aliento.
- En la región del Ruhr, los cierres de tantas minas y, por último (finales de 2018) de toda la minería del carbón están lejos de llevarse a cabo.
- Se necesitan soluciones adaptadas a cada lugar y región; no existen recetas generales en materia de política estructural.
- Recopilar, analizar y preparar experiencias hace más sabio...

Figura 5: Representación de la experiencia práctica con el cambio estructural en el Valle del Ruhr (RVR).

El gran potencial para el futuro de la metrópolis del Ruhr a la espera de su pinchazo o evolución se muestra también en un estudio realizado por RUFIS e IW Consult a instancia de la RVR (publicado en la primavera de 2020), cuyos resultados hacen que se pueda mantener la esperanza. Además de un detallado análisis DAFO de la economía, ciencia y calidad de vida, el estudio incluye un inventario completo de la enorme diversidad y paisaje científico de la región (21). No solo menciona varias actividades de investigación del THGA, sino que también menciona al FZN como instituto «único en el mundo» en la sección titulada *Highlights in Greentech – Waste Management and Environmental Protection* («Destacados en Greentech – Gestión de residuos y protección medioambiental» en español). Incluso se afirma que se buscan respuestas para preguntas que surgen al lidiar con agua y gas de mina, la reactivación y el seguimiento del uso de minas cerradas

y los efectos de la minería en la superficie. (22) Esto último constituye, en un sentido ampliamente socioeconómico relacionado con este contexto, la misión específica y la ambición del área de investigación Reactivación y Transición, y se ve como una contribución constructiva para asegurar que las regiones mineras tengan también un futuro, incluso tras su explotación.

Referencias

- (1) A general overview of the work of the Research Center of Post-Mining and its various research divisions can be found at <https://fzn.thga.de/> and in the FZN brochure "Damit Bergbauregionen Zukunft haben"- "For the Future of Mining Regions", Bochum 2020.
- (2) For an example of the experience from the regional development of the Ruhr Valley, cf. Brüggemann, J.; Kasperidus, L; Möllerherm, S.: Postmontane Regionalentwicklung Ruhr. In: Technische Hochschule Georg Agricola, Forschungszentrum Nachbarbergbau; Deutscher Markscheider-Verein (Ed.): Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2019. Übergang zu neuen Zeiten, Bochum 2019, pp. 270-278.
- (3) Cf. Kretschmann, J.: Research Areas in Post-Mining. In: Mining Report Glückauf 156 (2020), Issue 2, pp. 146-156, here: p. 152.
- (4) Ibid.
- (5) Ibid.
- (6) Ibid, p.153.
- (7) Cf. ibid. pp. 153-154.
- (8) For more detailed information on these interrelationships and a critical look at the energy and regional economic consequences of the coal exit, cf. van de Loo, K.: The Coal Exit-a High-Risk Adventure for the Energy Sector and Regional Economy. In: Mining Report Glückauf 155 (2019), Issue 2, pp. 178-193, and van de Loo, K.: The Energy and Regional Economic Consequences of the "Coal Commission". In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Vol. 68 (2018), Issue 10, pp. 10-13.
- (9) Van de Loo, K.; Tiganj, J.: Employment Stimulus for Post- Coal Mining Regions. In: Mining Report Glückauf 157 (2021), Issue 1, pp. 22-40.
- (10) <https://www.sgi-network.org/2020/>
- (11) Cf. van de Loo, K.: Social Engineering for Coal Mine Closures — a World Bank Report, the International Research Deficit and Reflections from a German Perspective. In: Mining Report Glückauf 155 (2019), Issue 4, pp. 394-412; specifically on developments in the world's largest (coal) mining and at the same time post-mining country, cf. Tiganj, J.; Kretschmann, J.; Rudolph, T.; van de Loo, K.: German Post-Mining as a Role Model for Developments in China. In: Mining Report Glückauf 157 (2021), Issue 1, pp. 41-49.

- (12) Ministry for Home Affairs, Municipal Affairs, Building and Equality NRW: Bericht zur Stadtentwicklung 2017, Stadtentwicklung in der Region – Interkommunales Handeln (2017).
- (13) For an overview, see <https://www.rvr.ruhr/politikregionalverband/europa/bergbauflaechen/diebergbauflaechenvereinbarung/>
- (14) Cf. Wandel als Chance: http://www.konzept-ruhr.de/fileadmin/user_upload/metropoleruhr.de/Wandel_als_Chance/Wandel_als_Chance_-_Positionspapier_2008.pdf
- (15) For an overview, see https://ec.europa.eu/energy/topics/oil-gas-and-coal/EU-coal-regions/events-and-news_en#news-and-newsletters
- (16) This applies to the future ancillary research for the new EU "Just Transition Mechanism", but also, e.g, to the coal-related part of the research programmes of the European Coal and Steel Research Fund (RFCS), which will focus on green transformation and post-mining from 2020 onwards, cf. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/research_and_innovation/contact/documents/rfcs_information_package_-_2020_call_-_rfcs_website_12062020.pdf
- (17) For these interrelationships, cf. van de Loo, K.: New National Raw Materials Strategy: No Sustainability without Inclusion of Post-Mining. In: Mining Report Glückauf 156 (2020), Issue 2, pp. 158-171.
- (18) <https://www.rag-stiftung.de/publikationen/zukunftsstudie>
- (19) Cf. www.ruhr-conference.nrw
- (20) Position paper of the Initiativkreis Ruhr: Chancenregion Ruhr - Impulse für den Sprung in eine erfolgreiche Zukunft, Essen June 2020.
- (21) Available at <https://rufis.de/studie-auf-dem-weg-zu-einer-starken-region-zukunftspotenziale-der-metropoleruhr-vorgestellt/>
- (22) Ibid, p. 116.

Publicado por primera vez en: Mining Report Glückauf 157 (2021) No.2, pp. 127-139.

El ciclo de vida minero y la Agenda 2030 de las Naciones Unidas – Un análisis sostenible

Peter Goerke-Mallet, Christian Melchers

Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Resumen

La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible han promovido el proceso de dar la misma consideración a aspectos sociales, ecológicos y económicos en la planificación y puesta en marcha de todo tipo de proyectos. Las dinámicas derivadas del aumento de la población mundial, la globalización y la lucha contra la crisis climática desempeñan un rol esencial hoy en día, lo que implica lidiar con desarrollos e instrumentos que no se pueden ignorar desde *el sector de las materias primas*, ya que están vinculados a una gran cantidad de riesgos y oportunidades. De hecho, el suministro de *recursos geológicos* requiere de un ajuste de actividades operativas y comunicativas que se adapten a estas nuevas condiciones.

Este artículo identifica los campos de acción para procesos de minería sostenibles en el *ciclo de vida de una mina o ciclo de vida minero* y muestra las consecuencias de la economía circular y de la recientemente aprobada ley de cadena de suministros en la industria minera. La narrativa minera que deriva de esto demuestra su aportación a la puesta en marcha de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. Desde el punto de vista del autor, estos objetivos podrán alcanzarse únicamente con la participación de la industria minera. No obstante, el sector de extracción debe demostrar activamente que forma parte de la solución. Esto conlleva una gestión de los riesgos y oportunidades transparente y completa, un proceso basado en la adaptación de datos de seguimiento y la involucración de todas las partes afectadas y *stakeholders*. Los futuros proyectos mineros se verán muy influenciados por la posición que tomen las partes en términos de transparencia, compromiso, participación y comunicación.

1 Introducción

La Agenda 2030 fue adoptada por los 193 Estados miembros de las Naciones Unidas en 2015 con el objetivo de iniciar cambios fundamentales para el desarrollo sostenible en todo el mundo (1). Por entonces, la ministra de Medioambiente alemana, Barbara Hendricks, describió la Agenda 2030 como histórica, ya que ponía en marcha una transformación sistémica. En un contexto de cambio climático, se trabaja la lucha contra la pobreza, la protección del medioambiente a nivel global, la mejora de estándares sociales y el desarrollo de una actividad económica compatible con el medioambiente.

La Comisión Mundial sobre el Medioambiente y el Desarrollo, también conocida como «Comisión Brundtland» (2), sentaba las bases de la definición para desarrollo sostenible en 1987 al afirmar: «(...) que el desarrollo sea sostenible, duradero, o sea, asegurar que

satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias». Siguiendo con la historia previa a la Agenda 2030, se encuentra la Conferencia de Río de Janeiro de 1991 y la Agenda 21 que se adoptó en la misma, así como la Cumbre del Milenio del año 2000. En esta última se adoptaron los 8 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) para alcanzar en 2015 (3). Entre otras cuestiones, los ODM buscaban reducir la pobreza y mejorar la educación, la sanidad, la ecología y las alianzas. Estos objetivos también se tratan en la Agenda 2030, adaptándose a las condiciones globales en cambio.

Durante la fase de preparación de la Cumbre de las Naciones Unidas que tuvo lugar en Nueva York en 2015, se preparó el documento *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* (1). El preámbulo organiza los temas de la «Agenda» en cinco áreas, las cinco P por su traducción en inglés: personas, planeta, prosperidad, paz y alianzas. Esto deja claro el objetivo de la Agenda: el desarrollo sostenible en el contexto de paz y alianzas, trabajando a su vez lo económico, ecológico y social.

Resulta evidente que sus cinco ejes recogen elementos esenciales del ciclo de vida de la minería. Los yacimientos, en torno a los que giran los procesos mineros, forman parte de nuestro planeta. Su uso es por y para las personas y, así, buscan el bienestar mutuo. Las intervenciones (por lo menos) temporales de la minería en el medio ambiente y la carga para las personas afectadas solo pueden mantener un rumbo claro gracias a las alianzas y a la paz. En el sentido más amplio, este aspecto también se expresa sorprendentemente por la conocida frase «mining is not one man's business» (la minería no es negocio de una sola persona, en español).

Esta perspectiva se ve respaldada por los resultados de una encuesta lanzada a grandes empresas mineras internacionales por la consultora EY (4). De acuerdo con la encuesta, la pérdida de la *licencia para operar* se ha considerado el mayor riesgo empresarial en los últimos años. Para estas empresas, la licencia para operar minas tiene un componente legal y social: sin el consentimiento de los grupos de interés (siendo tanto *stakeholders* como personas afectadas) resulta prácticamente imposible operar minas. En (5), Parra, Lewis & Ali, se subraya la importancia de la minería en la producción primaria y lamentan que los beneficios de la minería se suelen ocultar al consumidor final.



Figura 1: Principales áreas de investigación del FZN.

De hecho, Georg Agricola había lidiado ya con la licencia social para operar en su manual básico sobre la minería y la metalurgia *De re metallica* (6). En particular, en su primer libro *Arguments for and against this art* (cuya traducción sería «argumentos a favor y en contra de este arte» en español), trabaja los argumentos del público crítico hacia la minería. Su análisis del daño causado por los procesos mineros al medio ambiente y los beneficios que traen las actividades mineras a la sociedad pueden entenderse como un enfoque de gestión de riesgos. Como se ha observado, interpretado y comunicado sobre la minería, sus características y sus impactos. El Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN por sus siglas en alemán) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA por sus siglas en alemán) se compromete con la tradición del homónimo de la universidad (7). Esto se aplica en particular a la visión holística de la minería y de su ciclo de vida, que se refleja a su vez en las cuatro principales áreas de investigación del FZN (Figura 1).

Se espera que el crecimiento de la población mundial aumente la demanda de *recursos geológicos*, y que la suma de recursos cambie como resultado el progreso tecnológico y los procesos sociales. Con el fin de permitir unas cadenas de suministro transparentes y una creación de valor circular, se necesita abrir un debate social sobre la necesidad y la importancia de los proyectos mineros. El objetivo debe ser la creación de transparencia de todo el ciclo de vida minero y de sus procesos más relevantes, además de buscar generar acuerdo siguiendo una comunicación integral con todos los grupos de interés relevantes. Llegados a este punto, surge la cuestión sobre la relación entre el uso de yacimientos (recursos geológicos), el concepto de sostenibilidad y la práctica sostenible.

Cumplir los requisitos de materias primas y energéticos de la población, la producción y la industria no es posible sin las industrias minera y energética. Esto está relacionado con la influencia en el medio ambiente de las minas y las infraestructuras para la producción que no pueden limitarse siempre en el espacio y en el tiempo. Esto conlleva preguntarse si realmente puede desarrollarse, gestionarse y cesar la minería de forma sostenible. Si se tiene en cuenta la definición básica del término sostenibilidad, esta pregunta recibiría una respuesta probablemente negativa.

No obstante, esta cuestión ha llevado a los autores a buscar respuestas y desarrollar argumentos. Incluso con una puesta en marcha de procesos económicos circulares, la obtención de materias primas a través de la minería seguirá siendo necesaria para las economías nacionales. De esta forma, la industria minera debe participar en el debate sobre la sostenibilidad. De hecho, el sector minero está altamente involucrado en el compromiso para implementar la Agenda 2030 y, por tanto, debe ser un participante activo en el proceso de transformación para demostrar continuamente su futura viabilidad. Muestra de ello es también la llamada a una mayor transparencia en las cadenas de suministro.

2 La Agenda 2030 y los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Las cinco P (por sus siglas en inglés) se concretan más en los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (8 & 9). En las siguientes imágenes se muestran los 17 objetivos y cómo se organizan en las cinco P (Figuras 2 & 3). El contenido de los 17 ODS se desglosa en 169 metas.



Figura 2: Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible en las 5 P (por sus siglas en inglés) (creado por Figura 3).



Figura 3: Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (<https://onu.org.gt/objetivos-de-desarrollo/>).

2.1 La minería en los 17 ODS

Al trabajar con recursos geológicos, el trabajo de investigación del FZN se ha ido centrandando en alinear los procesos mineros con objetivos sostenibles partiendo de importantes hallazgos científicos, como los restos de extracciones de recursos geológicos o proyectos para su uso. Dentro de su estrategia de sostenibilidad, Alemania ha adoptado los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (8). Los fundamentos (las 5 P por sus siglas en inglés) están directamente relacionados con los ciclos de vida mineros y cuestiones económicas relativas a la gestión de recursos geológicos:

- Planeta: los recursos geológicos son parte de nuestro planeta. Su uso sostenible debe estar en armonía con la limitación del cambio climático. Al tratarse de elementos básicos del fundamento natural de la vida, los recursos geológicos deben utilizarse con cuidado de cara a futuras generaciones.
- Personas y prosperidad: los recursos geológicos sostenibles disponibles deben contribuir a la creación de buenas condiciones de vida para las personas, reducir la desigualdad global e influir en la globalización.
- Paz y alianzas: la economía de recursos geológicos solo se podrá organizar de forma sostenible si se parte de una solidaridad global y de alianzas apropiadas. Solo así se podrán garantizar los derechos humanos y una coexistencia pacífica.

En este contexto resulta evidente que los procesos mineros y el uso sostenible de recursos geológicos abordarían los 17 ODS. Así pues, se vincula en adelante cada ODS con afirmaciones que le corresponderían, habiéndose contado también en este análisis con las 169 metas. En un cartel de la Sociedad Geológica titulado *Geosciences for the future* (geociencias para el futuro en español), se asignan los ODS a sus propios retos y disciplinas (10). La figura 4 da una idea de la información de este cartel.

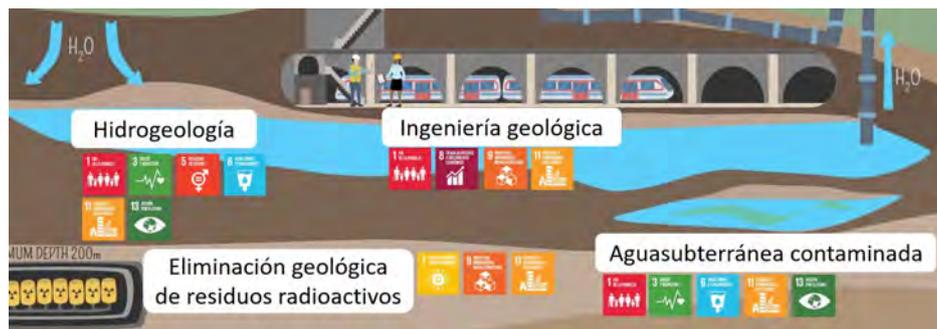


Figura 4: Geociencias para el futuro (extracto y traducción) en base a (10, editado).

Se pueden observar las siguientes cuestiones dentro de cada ODS al relacionarlos con los aspectos del ciclo de vida minero:

ODS 1 - Fin de la pobreza

Generar acceso a recursos geológicos; asegurar la propiedad de terrenos y recursos naturales; organizar la participación en el proceso económico; mejorar la calidad del medio ambiente a través de la revitalización; hacer a los grupos de interés y estructuras locales partícipes de los procesos económicos derivados del uso y la extracción de recursos geológicos; crear trabajos competentes con buenas posibilidades de ahorro; reducir la vulnerabilidad pública ante desastres.

ODS 2 - Hambre cero

Revitalizar progresivamente antiguas áreas mineras y hacer que permitan la producción de alimentos; proveer de fertilizantes y agua de forma fiable; desarrollar perspectivas económicas y sociales para aquellas personas afectadas por actividades mineras; preservar los ecosistemas.

ODS 3 - Salud y bienestar

Mejorar la seguridad laboral en la extracción y procesamiento de recursos geológicos; minimizar/prevenir la contaminación del medioambiente; promover la reutilización de explotaciones mineras; preservar la calidad de vida de aquellas personas afectadas por este sector; minimizar los riesgos mineros; fomentar la participación de los grupos de interés; crear prosperidad económica a través del sector minero; mejorar la gestión de riesgos de salud; velar por la transparencia de cadenas de suministro.

ODS 4 - Educación de calidad

Dar oportunidades educativas a estudiantes; concienciar sobre procesos sostenibles; aumentar las redes globales existentes; participar en el desarrollo de normas globales (ISO); intensificar la comunicación; proporcionar formación profesional especial (como rescate en minas); mejorar las competencias a través de la educación y la formación de profesionales en el propio país y en el extranjero; construir un saber hacer para que las personas afectadas puedan participar en los procesos de cambio; cumplir con requisitos para empleos y trabajos decentes; valorar aspectos culturales.

ODS 5 - Igualdad de género

Crear transparencia y aceptación hacia el papel de la mujer en el sector de recursos geológicos; preparar a mujeres para roles de liderazgo; reforzar la posición de mujeres en procesos de toma de decisiones; prevenir la discriminación; mejorar el derecho de acceso a recursos económicos.

ODS 6 - Agua limpia y saneamiento

Seguir normas de protección de aguas subterránea y potable; gestionar el agua como recurso; usar información geoespacial y medioambiental, así como datos derivados del control y supervisión geológicos; lidiar con cuestiones mineras/de agua subterránea; limpiar aguas subterráneas y purificar el agua de mina; analizar y tratar aspectos contaminantes; construir infraestructuras para suministros y desechos; aumentar el uso de agua eficiente; proteger ecosistemas.

ODS 7 - Energía asequible y no contaminante

Utilizar energía geotérmica y del hidrógeno; reactivar áreas para la producción de energía renovable; usar el potencial energético de materias primas (agua de mina y calor, metano, etc.) durante la cadena de suministros; asegurar el acceso a servicios energéticos; permitir el suministro de energía en comunidades locales; potenciar la unión de los sectores de la electricidad, generación de calor y movilidad.

ODS 8 - Trabajo decente y crecimiento económico

Desvincular el crecimiento económico del impacto medioambiental; crear cadenas de suministros transparentes; acabar con el trabajo forzado y el trabajo infantil; generar procesos para el uso sostenible de recursos geológicos; optimizar procesos en industrias de extracción; mejorar las posibilidades laborales; hacer partícipes a las personas afectadas de los procesos de cambio; mejorar la participación; fortalecer los derechos laborales.

ODS 9 - Industria, innovación e infraestructura

Invertir en ciencia, investigación y colaboración en investigación; velar por la reactivación y transición; establecer una transformación estructural; crear procesos innovadores de investigación «posmineos¹»; fomentar el crecimiento de startups (productos, servicios, etc.); promover laboratorios cualificados; mejorar la fiabilidad de las infraestructuras; promover el desarrollo tecnológico y la generación de valor local; minimizar las emisiones de CO₂ y CH₄; fomentar procesos inocuos al clima.

ODS 10 - Reducción de desigualdades

Mejorar el acceso al mercado de productos a países del Sur; generar transparencia en el contexto de la colaboración para la investigación y la transmisión de conocimientos; promover la inclusión económica y social; mejorar la participación en la toma de decisiones en instituciones globales; generar empleos para la población local; asegurar el salario decente y la protección social.

ODS 11 - Ciudades y comunidades sostenibles

Crear medidas para la reactivación y transición; llevar a cabo un control medioambiental y geológico; optimizar la gestión de recursos hídricos; supervisar microclimas; gestionar y usar recursos geológicos de forma sostenible; promover la economía circular; mejorar la protección de las aguas subterráneas; reducir la contaminación del medioambiente; minimizar los movimientos de tierra; evitar y regular los daños mineros ordenadamente; hacer reutilizables los legados mineros periódicamente; minimizar los riesgos para la seguridad en la superficie; crear nuevas perspectivas una vez finalizada la explotación minera.

ODS 12 - Producción y consumo responsables

Crear transparencia en las cadenas de suministros; mejorar la comunicación; subrayar la importancia de materias primas obtenidas mediante la minería dentro de la economía circular; optimizar la reutilización de estériles y residuos; planificar y organizar las fases tras el cierre de la mina; gestionar los residuos de forma ambientalmente responsable; mantener bajos los riesgos sociales y medioambientales; planificar instalaciones operativas y tener en cuenta fenómenos meteorológicos extremos; procesar las materias primas cerca del lugar de extracción; optimizar las cadenas de logística; optimizar la extracción, producción y procesamiento desde una perspectiva sostenible; reducir el impacto medioambiental; continuar la minería urbana; gestionar la descarbonización.

¹ N. de T.: Se utilizan los términos «posminera», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

ODS 13 - Acción por el clima

Llevar a cabo un control medioambiental y geológico; prevenir escapes de metano mediante el aprovechamiento para la generación de electricidad y de calor; mitigar fenómenos meteorológicos extremos mediante las infraestructuras mineras; evitar la degradación de la tierra; no perder de vista el secuestro de CO₂ y su almacenamiento subterráneo; dar lugar a la reducción de CO₂; iniciar procesos que lleven a la extracción de recursos sin impacto climático.

ODS 14 - Vida submarina

Reducir el vertido de aguas de mina contaminadas en aguas receptoras; proveer de medidas de tratamiento de aguas; extraer recursos geológicos de forma sostenible en el medioambiente marino; llevar a cabo un control medioambiental y geológico; proteger ecosistemas; planificar el uso de depósitos submarinos (minería marina) teniendo en cuenta los costes medioambientales; vigilar la fase tras la explotación de la mina.

ODS 15 - Vida de ecosistemas terrestres

Planificar la reactivación de zonas mineras con estándares elevados y su puesta en marcha de forma progresiva; considerar el posterior uso de infraestructuras; organizar la participación de los grupos de interés; mejorar la comprensión de los ecosistemas; optimizar la gestión del agua en la minería (por ejemplo, en pólders); contrarrestar la degradación del suelo; preservar la biodiversidad; reforestar; desarrollar la eliminación final de restos altamente radioactivos de forma transparente.

ODS 16 - Paz, justicia e instituciones sólidas

Generar transparencia en la provisión y el uso de recursos geológicos; reforzar la participación; promover el desarrollo de competencias; acabar con la explotación humana; mejorar la comunicación; promover el estado de derecho; rebatir la corrupción; generar acceso a materias primas y recursos.

ODS 17 - Alianzas para lograr los objetivos

Participar en investigaciones colaborativas; crear redes; intensificar la comunicación; organizar la transmisión de conocimientos; mejorar la colaboración en la ciencia, la innovación y el desarrollo tecnológico; promover el desarrollo de competencias; aumentar el acceso al mercado; diseñar modelos de negocio basados en la colaboración; desarrollar criterios de calidad para organizar alianzas y establecer criterios medibles; intensificar la participación.

El análisis muestra un amplio abanico acciones a tomar respecto a las oportunidades y los riesgos del ciclo de vida minero, así como de sus retos. Para desarrollar una narrativa minera, se deberán tener en cuenta los tres aspectos fundamentales de los procesos sostenibles (ecológicos, sociales y económicos). El apartado que sigue incluye pues un resumen de los principales puntos a tratar.

Ecológicos

Durante todo el ciclo de vida de la mina (i.e. desde la explotación, pasando por la fase de producción hasta el cierre y rehabilitación), se pueden observar diferentes impactos en el suelo, el agua y el aire. Se genera metano, un gas de efecto invernadero que se puede encontrar en el carbón, el lignito, el petróleo y el gas natural. Los vertederos y residuos industriales ocupan terreno y pueden llevar a que lleguen sustancias a las aguas subterráneas y de superficie. Además, las instalaciones de superficie causan el sellado del suelo. La extracción de recursos geológicos en o bajo la superficie interfiere también con el equilibrio de las aguas subterráneas naturales y puede llevar a una permanente alteración de masas de agua. Estos impactos no se terminan cuando cesa el proceso minero, sino que también influyen en gran medida en la fase tras el cierre de la mina. Entre otras cosas, esto lleva a preguntarse cómo podrían organizarse los procesos sostenibles en la remediación y saneamiento de instalaciones mineras cuando las tareas permanentes suponen un problema. En este contexto tienen especial importancia los recursos hídricos.

Un programa de seguimiento adaptado y una constante gestión del riesgo mejora la comprensión de los procesos en marcha. Esto aumenta, asimismo, la certeza de las previsiones y desarrolla conocimientos básicos para una comunicación vinculante, responsable y fiable con los grupos de interés, afectados incluidos (11).

Sociales

El uso sostenible de recursos geológicos es un requisito previo importante para aceptar extracciones de recursos, también en Alemania. La comunicación transparente de los impactos ecológicos, sociales y económicos y la aprobación general del público son prerrequisitos clave para la licencia social para operar o, dicho de otra manera, la aceptación social. Esto se aplica también a la fasnara, ya que un cambio estructural de éxito es un ingrediente esencial para la aceptación de medidas.

Los procesos mineros suelen poner de manifiesto enormes dinámicas espaciotemporales que solo se pueden comunicar al público siguiendo un enfoque holístico. En otras palabras, la comunicación debe basarse en argumentos comprensibles, claros y creíbles que recojan todos los aspectos del ciclo de vida de una mina. Esto conlleva, a su vez, tener rápidamente en cuenta cuestiones de transición y reactivación de áreas utilizadas para la minería. Solo se podrá alcanzar un cambio estructural con éxito si se hace partícipes a todos los grupos de interés y valorando las condiciones socioecológicas y socioeconómicas que les rodean.

Económicos

Se es consciente de la complejidad de los procesos mineros, cuyos aspectos principales son la dependencia de la ubicación de los yacimientos y la disponibilidad legal. Las previsiones muestran el riesgo minero por la naturaleza y la solvencia del yacimiento y la naturaleza del ciclo de vida a largo plazo con poca certidumbre. También se debería hacer referencia en este punto a la básicamente y casi inexistente flexibilidad de las industrias de producción primaria. Estas cuestiones podrían seguir y seguir, pero con-

viene tener en cuenta que los riesgos mencionados deberían cubrirse bien. Los debates sociopolíticos deberían tratar si estos riesgos se aplican solo a dimensiones económicas o si hay otros incentivos para llevar actividades mineras en el futuro. ¿Es ambicioso intentar superar localmente el principio de San Florián (la actitud NIMBY) de cara a proyectos de materias primas relevantes para toda la sociedad? Este artículo podría dar pie a un debate sobre las condiciones previas necesarias.

Más allá de estos tres aspectos principales, los procesos mineros solo podrán diseñarse de forma sostenible si se cualifica y educa a individuos responsables. A este respecto, el comprobado sistema para estrechar la relación entre investigación y enseñanza debería seguir. Esto se aplica también al constante intercambio entre práctica y ciencia basado en la existencia de plataformas nacionales e internacionales, que incluyen organizaciones profesionales, comités de especialidad e instituciones.

Como parte de la transformación, la ciencia debe ayudar a seguir desarrollando conocimientos del público y dar forma a la narrativa para las empresas mineras. Esto implica asumir proyectos sobre terreno y presentar su importancia ante toda la sociedad. En la antología de Parra, Lewis & Ali (5), se hace un análisis basado en evidencias de la relación entre la minería y los ODS. Se analizan factores favorables o limitantes en 17 capítulos individuales para profundizar el discurso general y rebajar las polémicas generadas entre los políticos y la industria.

Desde el punto de vista corporativo, podría concluirse que el paradigma sostenible no ha tenido aún un gran éxito. El análisis de Blühdorn et al. (12) se basa en este punto de vista: estos autores adoptan una visión crítica sobre el estado en que se encontraba el proceso de transformación. Así, criticaban el hecho de que la política sostenible no se relacionaría de forma empírica con condiciones y cambios en el medioambiente, sino más con preocupaciones y miedos de actores sociales. Hablan de la «narrativa esperanzadora» para mostrar su escepticismo sobre su eficacia transformadora. En su opinión, esta valoración se queda corta con relación al uso de recursos geológicos. El cruce entre «sostenibilidad», «creciente transparencia en cadenas de suministro» y «economía circular» genera grandes oportunidades para el sector de las materias primas que no deberían dejarse de investigar.

3 Transparencia en la cadena de suministro

La ley alemana sobre la cadena de suministro *Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten zur Vermeidung von Menschenrechtsverletzungen in Lieferketten* (Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz o LkSG) se publicó el 16 de julio de 2021 (13) y entrará en vigor el 1 de enero de 2023. Esta ley busca mejorar la protección de los derechos humanos en las cadenas de suministro, prohibiendo el trabajo de menores y forzado (14). Se especifica en esta, además, la diligencia debida y las obligaciones de las empresas en Alemania. Así, estas estarían en toda la cadena de suministros, i.e. desde las materias primas hasta el producto final. En este contexto, los requisitos para cada empresa se gradúan en función de su capacidad para ejercer influencia.

La adopción de la ley de cadena de suministro conlleva un cambio de paradigma (15), en línea con la demanda de las ONG de reformar la estrategia y política alemana de materias primas. Cabe lamentar que la extracción de materias primas genere con demasiada frecuencia problemas que no puedan ser resueltos únicamente por las personas afectadas. Así, la riqueza de materias primas puede volverse una maldición. De hecho, muchas cuestiones indican que se violan derechos humanos y que se generan daños medioambientales en el sector de materias primas (16). Este indeseado desarrollo debe contrarrestarse mediante una mayor diligencia y transparencia en las cadenas de suministro. La transición de una responsabilidad social corporativa voluntaria hacia requisitos vinculantes conlleva establecer la diligencia debida y obligaciones medioambientales y hacer cumplir las normativas. Estos esfuerzos cuentan con el respaldo de la UE por el reglamento sobre los minerales en zonas de conflicto, que entró en vigor el 1 de enero de 2021. La importación de estaño, tantalio, wolframio y oro está ahora sujeta a diligencia debida específica y obligaciones de verificación en la cadena de suministro (17). También se debe hacer referencia al Green Deal (o Pacto Verde) europeo, que busca promover medidas que sean eficientes respecto a los recursos y mejorar la participación de la población y las regiones (18).

Los procesos iniciados deberían influir en la percepción general de la sociedad en la disponibilidad global de las materias primas. De hecho, el público general no suele comprometerse con su comportamiento de consumo y con cuestiones sobre el origen de las materias primas en los productos que se consumen. Al igual que en otros sectores de producción primaria, hay una gran alienación del público respecto a la forma en que se extraen y procesan materias primas. En el debate sobre el cambio en la industria energética y la movilidad resulta particularmente evidente esta actitud. De esta manera, hasta ahora no se ha generado un gran debate sobre la disponibilidad de las materias primas necesarias. En este contexto, se debe hacer referencia al trabajo de la German Mining Network (red minera alemana), compuesta por ocho centros de competencias en asuntos de minería y materias primas en cámaras de comercio extranjeras de naciones importantes a nivel de materias primas y que cuenta con el apoyo del Ministerio Federal de Economía y Energía (en adelante BMWi por sus siglas en alemán) (19). La THGA es miembro de esta red con otras instituciones.

Crear transparencia debería combinarse con un esfuerzo por mejorar la comunicación. De esta forma, se generaría una mayor comprensión entre el público de los retos nacionales y globales a los que se enfrentan las industrias extractoras. La Iniciativa sobre la Transparencia en las Industrias de Extracción (EITI por sus siglas en inglés) (29) consiste en una iniciativa de transparencia respaldada por 56 países. Sus objetivos incluyen proveer datos para procesos durante toda la cadena de valor de materias primas, dar forma al diálogo sobre el uso de ingresos del sector de extracción y contribuir a una mejor gobernanza. Al transponer los estándares internacionales al marco nacional desde el gobierno alemán de la mano de expertos de la industria y asociaciones, entre otros, se marcaba el rumbo en 2015 para mejorar la transparencia también en el sector minero nacional (21). Dentro de su actual contribución a la cuestión sobre materias primas, el BMWi subraya explícitamente las ventajas de su extracción nacional, describiéndolo como más ecológico, seguro (a nivel de salud y seguridad laboral) y participativo (al

generar empleo local) (22). El objetivo oficial del gobierno alemán consiste en alinear la minería nacional con los 17 ODS y el sector de las materias primas con la economía circular (23). Esto se ve respaldado por el documento elaborado por el grupo de especialistas en materias primas *Scientists for Future* (científicos para el futuro) (24) que propone reforzar la industria minera nacional en cuanto a sus materias primas críticas y que trabaja sobre la minería responsable y la promoción de la economía circular.

4 Economía circular

El concepto de la economía circular se basa en ciclos cerrados del desarrollo, la producción, el uso y el desecho de productos (25) y tiene en cuenta todo el ciclo de vida de un producto, su proceso de creación de valor y sus beneficios para los consumidores. Frente al actual modelo económico lineal, el crecimiento económico en la economía circular no se basa idealmente en el uso de materias primas primarias, sino que deja espacio para la innovación y el desarrollo económico. Este tipo de sistema económico también puede considerarse sostenible en base a los 17 ODS. El proceso de «creación de valor circular» y sus elementos pueden observarse en la figura 5.

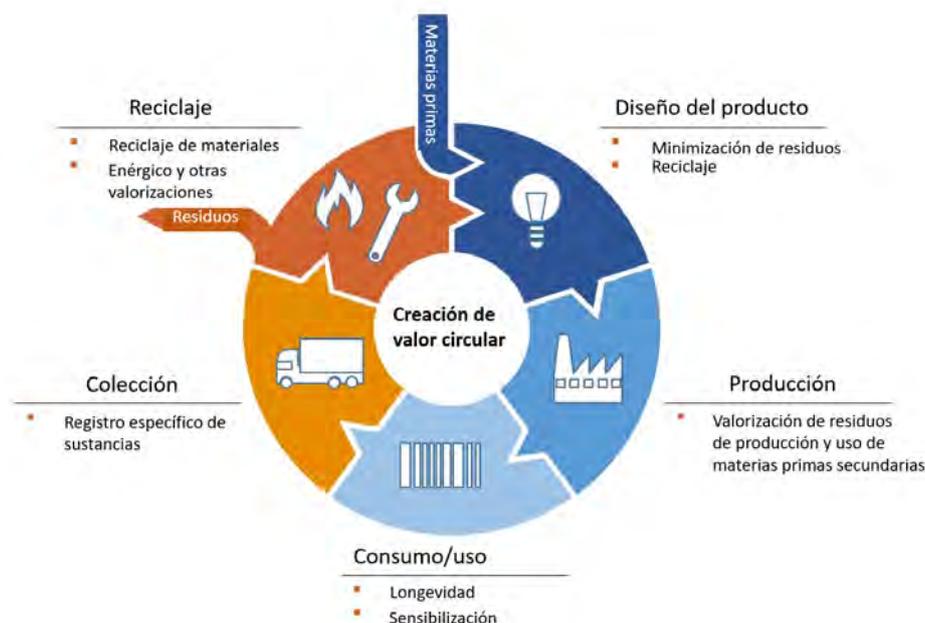


Figura 5: Economía circular (26, editado).

La importancia del concepto circular para la minería y la economía de las materias primas es evidente. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las materias primas primarias también son necesarias en este modelo económico. La proporción de materias primas producidas en la minería variará bastante de producto a producto punto a este respecto, de forma que la descripción de las diferentes fases del ciclo de vida de productos individuales resulta indispensable. Aquí se podría usar una adaptación del dicho popular: «Si no puedes aumentarlo o reutilizarlo, tienes que minarlo».

Si se echa un vistazo a los argumentos de los más escépticos del concepto de creación de valor circular se pueden observar diferentes cuestiones (27): su ejemplo sobre la «arena» como materia prima muestra que, entre otras cosas, que el hormigón resultante depende principalmente de un toque «fresco». Asimismo, las regulaciones técnicas y de seguridad aplicables no se suelen adaptar al ampliado uso de materiales reciclados cuyas propiedades de calidad no se certifican. Si se observa el yacimiento de materias primas de los desechos electrónicos, se ve que la concentración de ciertos elementos es bastante mayor en yacimientos naturales. Se suele asumir que la compatibilidad medioambiental del proceso es inherente al sistema, pero no se cuenta con pruebas sobre ello. Teniendo en cuenta a Alemania como mayor exportador, conviene anotar que las materias primas de bienes exportados no forman parte del ciclo y dejan de poder usarse para equilibrar la creación de valor circular.

Aquí entra en juego la cuestión sobre el llamado «efecto rebote». De acuerdo con este, una reducción de los costes de producción de un producto (que sería el resultado del ciclo circular) aumentaría el consumo. Así, resulta también interesante entender mejor los deseos y reacciones de los consumidores. Existe el riesgo de que un punto de vista técnico de la creación de valor circular no esté realmente alineado con las preferencias del consumidor (27).

La estrategia de la creación de valor circular debe verse como una respuesta consistente ante el nuevo paradigma sostenible. No obstante, los procesos de transformación asociados con esto son particularmente difíciles debido a la naturaleza holística de la economía circular. Como resultado, el pensamiento basado en hechos en términos de oportunidades y riesgos, la constante observación de los procesos en marcha y la creación de transparencia a partir de la comunicación con los grupos de interés resultan también claves.

5 Conclusiones

Una población de casi 8 000 millones de personas y su derecho a condiciones de vida digna supone enormes retos para el uso de recursos geológicos. Lidar con el cambio climático, la transición de energía y movilidad y la digitalización cambiará los componentes y el alcance del conjunto de las materias primas. La provisión de estos recursos debe seguir lo estipulado por los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. De otra forma, la actual alienación de los consumidores que ven la minería como un elemento básico de la producción primaria se vería reforzada.

La clave para la industria extractora consiste en trabajar la implementación de los 17 ODS, que cubren diferentes aspectos de la minería. Los potenciales riesgos y oportunidades de los proyectos mineros deben gestionarse durante todo su ciclo de vida, yendo acompañados de programas de control geológico apropiados y comunicándose de forma transparente y vinculante a los grupos de interés.

La sostenibilidad también es un elemento clave para la transparencia de la cadena de suministro para una gran variedad de materias primas y productos y para el diseño de

procesos de la creación de valor circular. Asimismo, las compañías e instituciones involucradas en la provisión de recursos geológicos deberían participar también, y todo ello requerirá de una narrativa minera que exprese de manera convincente sus esfuerzos hacia la sostenibilidad, la transparencia y la comunicación. En el futuro, la responsabilidad corporativa incluirá a más grupos de interés y accionistas. La minería podría entonces asumir el rol de proveedor de materias primas, y el mundo podría confiar en esta para afrontar retos globales.

Referencias

- (1) Martens, J.; Obenland, W. (2017): Die Agenda 2030. Globale Zukunftsziele für nachhaltige Entwicklung. Online: https://www.globalpolicy.org/sites/default/files/Agenda_2030_online.pdf (visitado por última vez el 27/11/2021).
- (2) Lexikon der Nachhaltigkeit. Brundtland Bericht, 1987. Online: https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/brundtland_report_563.htm (visitado por última vez el 27/11/2021).
- (3) Die Millenniums-Entwicklungsziele (Millennium Development Goals, MDG) (2009). Online: <https://reset.org/die-millenniums-entwicklungsziele-millennium-development-goals-mdg/> (visitado por última vez el 27/11/2021).
- (4) Ernest & Young (EY) (2020): Top 10 business risks and opportunities – 2020. URL: https://www.ey.com/en_gl/mining-metals/10-business-risks-facing-mining-and-metals (visitado por última vez el 28/12/2021).
- (5) Cristian Parra, C.; Lewis, B.; Ali, S. H. (Hrsg.) (2021): Mining, Materials, and the Sustainable Development Goals (SDGs) 2030 and Beyond. Taylor & Francis Group, LLC, 240 S.
- (6) Agricola, G.: Vom Berg- und Hüttenwesen. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1977, 610 S.
- (7) Goerke-Mallet, P.; Rudolph, T.; Brune, J. F.; Kretschmann, J. (2020): Die Bedeutung der „Social Licence to Operate“ für den bergbaulichen Lebenszyklus. In: Mining Report Glückauf (156), Heft 4, S. 323 – 332.
- (8) Bundesregierung (2021): Nachhaltigkeitsziele verständlich erklärt. Online: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/nachhaltigkeitsziele-verstaendlich-erklaert-232174> and <https://sdgs.un.org/goals> (visitado por última vez el 18/12/2021).
- (9) Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung BMZ: Agenda 2030. Die globalen Ziele für nachhaltige Entwicklung. Online: <https://www.bmz.de/de/agenda-2030> (visitado por última vez el 18/12/2021).
- (10) The Geological Society: Geowissenschaften für die Zukunft. Online: <https://www.geolsoc.org.uk/Posters> (visitado por última vez el 19/12/2021).

- (11) Rudolph, T.; Goerke-Mallet, P. (2021): Steigerung der gesellschaftlichen Akzeptanz im Management von Tailings-Storage-Facilities (TSF). In: GeoResources Zeitschrift 3/2021, S. 35 – 40. Online: <https://www.georesources.net/images/Sonderdrucke/Steigerung-der-gesellschaftlichen-Akzeptanz-im-Management-von-Tailings-Storage-Facilities-GeoResources-Sonderdruck.pdf> und <https://www.georesources.net/images/Sonderdrucke/Increasing-social-Acceptance-in-the-Management-of-Tailings-Storage-Facilities-GeoResources-Special-Edition.pdf>
- (12) Blühdorn, I. et al. (2020): Nachhaltige Nicht-Nachhaltigkeit. Warum die ökologische Transformation der Gesellschaft nicht stattfindet. 2. Auflage, transcript Verlag Bielefeld. ProQuest Ebook Central, 346 S.
- (13) Buzer.de Bundesrecht. Online: <https://www.buzer.de/LkSG.htm> (visitado por última vez el 18/12/2021).
- (14) Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung BMZ (2021): Das Lieferkettengesetz ist da. Online: <https://www.bmz.de/de/entwicklungspolitik/lieferkettengesetz> (visitado por última vez el 30/11/2021).
- (15) Initiative Lieferkettengesetz.de (2021): Was das neue Lieferkettengesetz liefert – und was nicht. Online: https://www.germanwatch.org/sites/default/files/Initiative-Lieferkettengesetz_Analyse_Was-das-neue-Gesetz-liefert_0.pdf. (visitado por última vez el 18/12/2021).
- (16) Extractive Industries Transparency Initiative EITI (2021): Was nützt (D)EITI? Die Transparenzinitiative über Rohstoffabbau in Deutschland auf dem Prüfstand. Online: <https://www.forumue.de/was-nuetzt-d-eiti-die-transparenzinitiative-ueber-rohstoffabbau-in-deutschland-auf-dem-pruefstand/> (visitado por última vez el 28/12/2021).
- (17) IHK Düsseldorf (2021): EU-Konfliktmineralien-Verordnung. Online: <https://www.duesseldorf.ihk.de/aussenwirtschaft/aktuelles/eu-konfliktmineralien-verordnung-5078304> (visitado por última vez el 18/12/2021).
- (18) Europäische Kommission: Umsetzung des europäischen Grünen Deals. Online: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_de und https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (visitado por última vez el 20/12/2021).
- (19) German Mining Network: Internationale Bergbau- und Rohstoffkompetenz für deutsche Unternehmen. Online: <https://germanmining.net/> (visitado por última vez el 20/12/2021).
- (20) Extractive Industries Transparency Initiative EITI (2021): The global standard for the good governance of oil, gas and mineral resources. Online: <https://eiti.org/> (visitado por última vez el 18/12/2021).

- (21) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWi (2021): Transparenz in der rohstoffgewinnenden Industrie. Online: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/gewinnung-heimischer-rohstoffe-transparenz-06.html> (visitado por última vez el 28/12/2021).
- (22) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2021): Rohstoffe. Bergbau, Recycling, Ressourceneffizienz - wichtig für Wohlstand und Arbeitsplätze. Online: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffe-bergbau-recycling-ressourceneffizienz.pdf?__blob=publicationFile&v=18 (visitado por última vez el 28/12/2021).
- (23) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Rohstoffstrategie der Bundesregierung Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffe. Online: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/rohstoffstrategie-bundesregierung.html> (visitado por última vez el 18/12/2021).
- (24) Ganswind, F.; Neumann, M.; Diedel, R.; Engelbrecht, H.; Junge, M.; Masurenko, C. (2021): Positionen zu einer nachhaltigen Rohstoffstrategie Deutschlands. Diskussionspapier der Fachgruppe Rohstoffe von Scientists for Future (S4F). 4 S., doi:10.5281/zenodo.5768187.
- (25) Prosperkolleg (2021): Was ist zirkuläre Wertschöpfung. Online: <https://prosperkolleg.de/was-ist-zirkulaere-wertschoepfung/> (visitado por última vez el 17/12/2021).
- (26) Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW: Perspektive auf die wertschöpfungskette/ Zirkuläre Wertschöpfung. Online: <http://www.zirkulaere-wertschoepfung-nrw.de/Zirkul%C3%A4re-Wertsch%C3%B6pfung/Perspektive-auf-die-Wertsch%C3%B6pfungskette/> and <https://www.europarl.europa.eu/committees/de/circular-economy-action-plan-/product-details/20201106CDT04441> (visitado por última vez el 19/12/2021).
- (27) Loviscach, J. (2020): Zirkuläre Wertschöpfung: Wo knirscht es. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=yrtTiON2RdQ> (visitado por última vez el 17/12/2021).

Publicado por primera vez en: Mining Report Glückauf 158 (2022) No.1, pp. 59-71.

Optimización de la gestión de agua de mina a largo plazo en explotaciones de minas mediante perforación direccional y tecnología de revestimiento

Peter Goerke-Mallet¹, Frank Mersmann², Thorsten Beermann³, Max Thomas Stöttner⁴

¹Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania; ²SAERTEX multicom GmbH, Saerbeck, Alemania; ³Beermann Drilling technology GmbH, Hörstel-Riesenbeck, Alemania; ⁴Osnabrück University of Applied Sciences, Osnabrück, Alemania

Resumen

La extracción de materias primas en la minería subterránea o a cielo abierto suele ir asociada a una intervención en el balance hídrico. Por lo tanto, para garantizar un proceso de producción seguro y eficaz, el agua debe ser drenada. La gestión de las aguas de mina, de carácter sostenible, debe garantizarse tanto en la fase activa de explotación como en la fase posterior a la misma. Además, las antiguas explotaciones mineras suelen caracterizarse por problemas hidrogeológicos no resueltos.

Este artículo trata de las posibilidades de optimizar la gestión del agua de mina y geotérmica basándose en el uso de la tecnología de revestimiento de tubos. Esta técnica, de eficacia probada, puede adaptarse a la hidroquímica específica, a la forma de construcción y al estado de la infraestructura existente. La tecnología de revestimiento de tubos también puede utilizarse en combinación con perforaciones largas, direccionales y horizontales o inclinadas.

Según los autores, existen puntos de partida nacionales e internacionales para la optimización de soluciones en el uso de revestimientos de tuberías para el drenaje de minas en funcionamiento y abandonadas. La tecnología actualmente disponible para la realización de perforaciones horizontales de gran longitud puede proporcionar efectos sinérgicos. El presente artículo también pretende ofrecer sugerencias para mejorar la fiabilidad de la planificación de los nuevos proyectos mineros.

1 Introducción

Las minas activas suelen estar en permanente conflicto con el equilibrio hídrico de su entorno, pero suelen contar con una infraestructura de gestión del agua y personal competente. Las antiguas minas suelen carecer de ambas cosas. Además, la hidroquímica del agua de mina provoca repetidamente problemas en el agua receptora. Esta situación no es aceptable desde el punto de vista técnico ni se ajusta a los requisitos de la Directiva Marco del Agua de la UE.

El campo de la minería, la gestión del agua y las infraestructuras, con sus características especiales, se encuentra en todo el mundo y ha desafiado a los autores a desarrollar ideas innovadoras. Las propuestas para abordar el problema se basan en la combinación de técnicas y procedimientos probados, teniendo en cuenta la eficiencia económica. Nuestro objetivo es entablar un debate con los expertos sobre los enfoques de las soluciones e identificar las aplicaciones potenciales. Las explicaciones adicionales sirven para demostrar la viabilidad práctica y complementan las explicaciones de nuestra publicación en la revista «bergbau» con el título «Contribución a la rehabilitación de la infraestructura para el vertido de aguas de mina después del cierre» (1).

Para concretar el problema, se simula el caso de una mina inundada hasta el umbral más bajo de desbordamiento efectivo desde el punto de vista hidráulico (tope de la galería en el pozo) (Figura 1). El agua de la mina se drena de la galería y se conduce a través de una tubería subterránea desde la boca de la galería hasta un punto de descarga en el agua receptora (Figura 2). La cubierta de la galería aumenta de 0 m a 100 m. La galería y la tubería deben ser rehabilitadas y aseguradas.

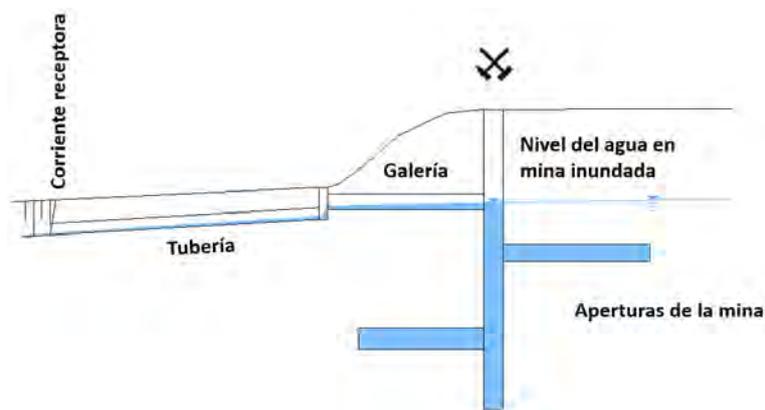


Figura 1: Toma y descarga del agua de la mina.



Figura 2: Galería de drenaje en mampostería de arenisca (Foto: G. Mäscher/M. Sünkler).

La hidroquímica del agua de mina se caracteriza por el aumento de los contenidos de sal, hierro y sulfato y por los valores bajos o altos de pH. El término «aguas agresivas» es aplicable a estas aguas en el sentido más amplio. El volumen de agua puede ser de varias decenas de miles de metros cúbicos al día. La infraestructura para el vertido seguro y sostenible del agua de mina debe adaptarse a esta situación inicial.

2 Tecnología de revestimiento de tubos

En el documento técnico citado se estudiaron detalladamente las posibilidades de rehabilitación de las infraestructuras de drenaje. En consecuencia, se promueve la instalación de un revestimiento de tubería en este punto, es decir, se sugiere la rehabilitación sin zanja utilizando un método de construcción cerrado. Los revestimientos de tuberías son mangas fabricadas con materiales compuestos, incluyendo diversos elementos, como fibras de vidrio y vellones, en su mayoría impregnados con resinas sintéticas termoestables. Se colocan y curan después de introducirlos en la tubería que se va a rehabilitar (Figura 3). La estructura de resina de vidrio del revestimiento de la manga es resistente a los productos químicos y se ha demostrado que está diseñada para la rehabilitación de las tuberías durante otros 70 - 100 años. Estos resultados también se aplican explícitamente a la hidroquímica del agua de mina mencionada anteriormente. El revestimiento de las mangas son resistentes al metano y al dióxido de carbono y son herméticos al gas a bajas presiones. Cabe destacar que con el desarrollo especial del SAERTEX-LINER Premium -con revestimiento interno- incluso las tuberías no presurizadas por gravedad pueden ser mejoradas o convertirse en tuberías de presión.

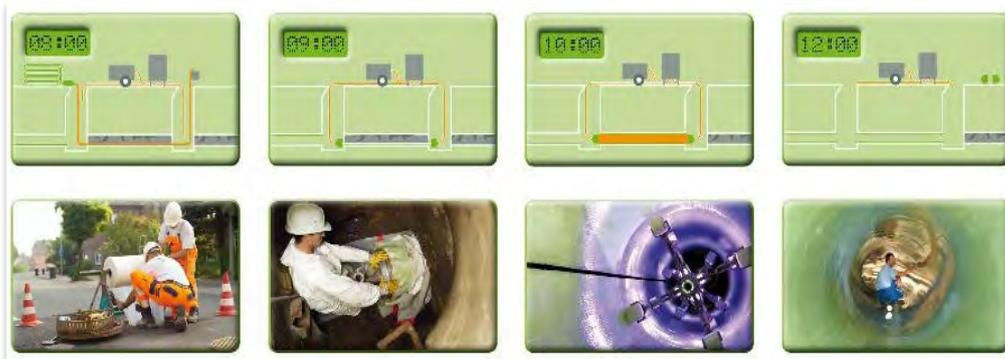


Figura 3: Reparación rápida en pocas horas/ Curado con la moderna tecnología de luz UV (Fotos: SAERTEX multiCom® GmbH).

La estructura de la galería (Figura 4) se rehabilitará instalando dos revestimientos de tuberías de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y rellenando completamente el espacio libre restante con material de construcción. Esto crea un alto grado de estabilidad y capacidad operativa a largo plazo, como se demuestra en la comparación de variantes en la publicación mencionada anteriormente. Sin embargo, en este caso la estructura pierde su capacidad de drenaje. Este aspecto puede ser importante dependiendo de la situación hidrogeológica.

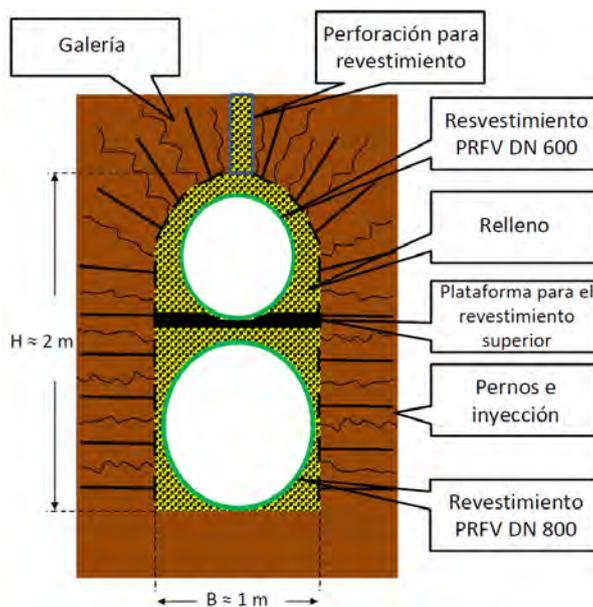


Figura 4: Galería rehabilitada y totalmente rellena con dos revestimientos de manguera de PRFV (Gráfica: Max Thomas Stöttner, editado).

Gracias a la redundancia de tuberías, las incidencias en uno de los revestimientos de las tuberías de PRFV así como como las limpiezas e inspecciones programadas, pueden gestionarse sin perder la utilidad hidráulica de la galería. Según los conocimientos actuales, no es necesaria una renovación del revestimiento de las tuberías de PRFV. La vida útil mínima de 70 años indicada por el fabricante no ha sido probada empíricamente, sino que se basa en proyecciones conservadoras. No obstante, si la rehabilitación repetida con revestimientos de tuberías de PRFV ocurriera, también sería una solución viable.

Los resultados satisfactorios de la rehabilitación del drenaje pueden trasladarse a los costes de explotación previstos. Los revestimientos de tuberías de PRFV de paredes lisas son menos susceptibles de adherirse y pueden volver a limpiarse más rápidamente. La reparación de las conexiones de las tuberías con fugas no es necesaria.

3 Tecnología de perforación horizontal

La rehabilitación de una infraestructura existente para su drenaje a largo plazo de la manera descrita requiere condiciones casi secas en las labores mineras, al menos durante la fase de construcción. Este podría darse, por ejemplo, durante la fase de inundación de la mina en cuestión. Para asegurar el drenaje del agua, se puede considerar la excavación de una nueva galería. No obstante, la construcción de pozos horizontales o inclinados puede ser una alternativa económica. Esta técnica es especialmente adecuada cuando el espacio en el lugar de la perforación es limitado.

El proceso de producción de perforaciones horizontales dirigidas, ha adquirido una importancia considerable en la tecnología de perforación y construcción de los últimos años. La tecnología de «perforación horizontal dirigida» (PHD) está experimentando un

desarrollo rápido y constante. Los autores pretenden presentar brevemente los fundamentos del método y mostrar las sinergias para el drenaje, resultantes de la combinación con la tecnología de revestimiento de tubos (2).

La empresa Beermann Bohrtechnik GmbH, de Hörstel-Riesenbeck, trabaja con la tecnología de perforación horizontal desde 1995. Los proyectos realizados hasta ahora han convertido este método, apenas conocido hace unos años, en una potente tecnología de construcción sin zanjas que también se utiliza en roca maciza. La empresa utiliza el método de perforación horizontal para perforar bajo masas de agua, canales, líneas de ferrocarril o carreteras con el fin de colocar tramos de tubería de hasta 1 500 m de longitud bajo tierra y de forma respetuosa con el medioambiente.



Figura 5: 250t-Plataforma de perforación.

Con equipos de perforación de 6,5 t a 250 t de fuerza de tracción y empuje (Figura 5), se perfora con precisión un pozo piloto en todas las clases de suelo y en roca maciza mediante una suspensión de perforación por medio de un sistema de localización. En el siguiente paso, la perforación se ensancha con los llamados retroensanchadores en una o varias operaciones (Figura 6). Después de este paso, se introduce una tubería de plástico, hierro fundido o acero en la perforación ya estabilizada (Figura 7).



Figura 6: Ensanchador de pozos en roca maciza (Hole Opener).

La figura 7 muestra los tres pasos que hay que realizar en principio para las perforaciones horizontales. Un elemento esencial de la planificación del proyecto de perforación horizontal es la determinación del perfil de perforación entre el punto de entrada y el de salida (3). El proceso de perforación comienza con la perforación piloto controlada tridimensionalmente a lo largo de la línea de perforación determinada en la planificación de la perforación. La columna perforadora está equipada con un cabezal de perforación adaptado al suelo o a la roca (Figura 8).

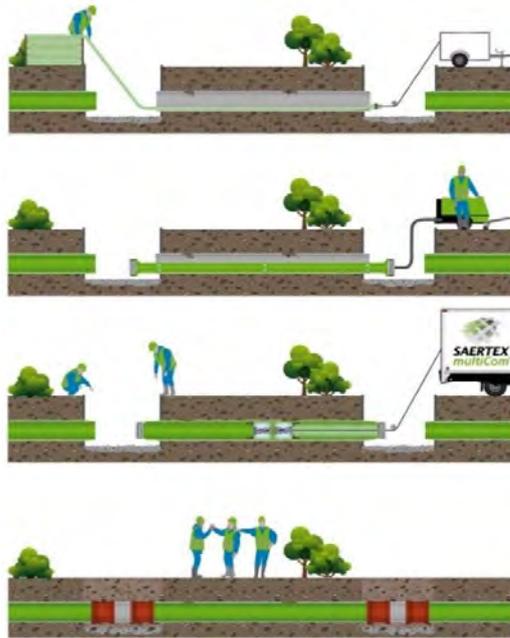


Figura 7: Esquema del principio de la perforación piloto - ensanchamiento - introducción de la tubería. (Gráfica: SAERTEX multiCom® GmbH).



Figura 8: Broca para el agujero piloto.



Figura 9: Sistema de localización.

Los cambios de dirección e inclinación del cabezal de perforación determinados por un sistema de localización (Figura 9) se transmiten a través de un cable en la sarta de perforación a un dispositivo receptor situado en la superficie. El sistema de localización, denominado *DrillGuide*, se basa en la navegación inercial e incluye un giroscopio láser (giroscopio óptico) en su núcleo. La trayectoria recorrida por el cabezal de perforación y las correcciones direccionales que quedan por hacer se calculan y muestran permanentemente.

Para el control de perforaciones con brocas rotativas en suelos de densidad media, se inserta una pieza articulada en la sarta de perforación entre la broca y el sistema de localización y se corrige el curso de la perforación mediante el avance y la rotación, o solo mediante el avance. Para las perforaciones en roca maciza, se utilizan los llamados motores de lodo, que son accionados por el fluido de perforación. También en este caso, los pliegues de la sarta de perforación se utilizan para el control, entre otros usos.

4 Planificación

Las consideraciones de planificación para asegurar una estructura de la galería a través de la cual se desvíe a la superficie el agua de una mina inundada se basan en la construcción de un pozo de sondeo poco profundo, inclinado y ensanchado, paralelo a la galería existente.

Hay que asegurar la estructura de la mina inundada descrita en la definición del problema, concretamente en una longitud de 1 000 m. Al final de esta sección, con una inclinación de 2 mm/m, hay un antiguo pozo de unos 40 m de profundidad. En la base del pozo, el agua de mina fluye hacia la galería desde diferentes direcciones. En este punto de las labores mineras es conveniente distribuir el agua de mina a la galería o al pozo de manera controlada en cuanto a cantidad o nivel.

El pozo sirve como zona receptora (punto de destino) para la perforación piloto después de su elaboración y como cámara de montaje para los retroensanchadores durante la siguiente fase de ensanchamiento de la perforación. La máquina de perforación se instala cerca de la boca de la galería. La potencia de la máquina, la broca y el fluido de perforación se ajustan a la arenisca carbonífera de la trayectoria de perforación y a las fallas tectónicas previstas. La perforación piloto tiene un diámetro de unos 30 cm. La perforación se ensancha en varios pasos hasta alcanzar un diámetro final de unos 100 cm. A continuación, se introduce un tubo de revestimiento en la perforación a través del pozo.

A modo de ejemplo, se describe el aseguramiento de un sistema de drenaje con ayuda de perforaciones horizontales. El objetivo era mostrar la planificación actual y las posibilidades técnicas que ofrece el método PHD en combinación con el uso de revestimientos de tuberías.

5 Perspectivas

Casi todos los procesos mineros interfieren en el balance hídrico de la zona circundante. En otras palabras, la minería de superficie o subterránea solo puede explotarse junto con una gestión eficaz del agua. La recepción, el vertido y, en su caso, el tratamiento ordenado del agua de mina, desempeñan un papel especial tanto en la fase de explotación como en la de cierre y posminería. Para la optimización técnica y de costes, se deben encontrar soluciones específicas para cada explotación minera. Sin embargo, existen puntos comunes en las infraestructuras necesarias para la gestión del agua a largo plazo. Este documento destaca las posibilidades de optimizar la gestión del agua en la minería a partir del uso de la tecnología de revestimiento de tuberías. Esta técnica probada puede adaptarse a la hidroquímica específica, al tipo de construcción y al estado de la infraestructura existente.

El uso de la tecnología de perforación horizontal es de especial interés para el drenaje eficiente y rentable del agua de mina. Hoy en día, existen posibilidades técnicas para perforar largos pozos horizontales o inclinados, incluso en roca maciza. El artículo describe el estado actual de la tecnología en un caso que puede encontrarse con regularidad de forma similar en la (pos)minería nacional e internacional.

Un reto central en antiguas minas es la aceptación, el tratamiento y el vertido ordenado y sostenible del agua de mina. Para ello, se dispone de labores mineras e instalaciones técnicas que hay que asegurar o construir de nuevo. Este artículo describe cómo la infraestructura para el drenaje a largo plazo y posterior al cierre de la mina puede construirse hoy en día de forma eficaz y económica con la ayuda de perforaciones largas horizontales dirigidas y la tecnología de revestimiento de tubos.

Referencias

- (1) Goerke-Mallet, P., Mersmann, F., Schmelzer, H., Stöttner, M. T., Giebelmeyer, H. (2014): Beitrag zur Sanierung der Infrastruktur für die nachsorgeoptimierte Ableitung von Grubenwässern. *Bergbau* 7/2014, S. 293-299.
- (2) Goerke-Mallet, P., Mersmann, F., Beermann, T., Stöttner, M. T. (2014): Optimierung der langfristigen Wasserhaltung von Bergbaubetrieben mit Hilfe langer gerichteter Bohrlöcher und Schlauchliner-Technik. *Altbergbau-Kolloquium*, Essen: VGE Verlag GmbH, pp. 163-71.
- (3) Mücke, T. (2008): Störanfälligkeiten in der Horizontalbohrtechnik. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln.

Publicado por primera vez en: *Mining Report Glückauf* 152 (2016) No.2, pp. 171-177.

Capítulo 2 - Subida del agua de la mina

La hulla española y la posminería: impresiones de Asturias

Bastian Reker, Peter Goerke-Mallet, Sebastian Westermann, Christian Melchers

Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Resumen

Asturias fue la región minera de carbón más importante de España. Al igual que en Alemania, la minería del carbón subvencionada concluye en 2018. Con vistas a las consecuencias del cese de las medidas de drenaje, las subidas de agua de mina y las repercusiones económicas y ecológicas, tanto personales como medioambientales, el Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) de Bochum realizó una visita de campo para iniciar un intercambio de experiencias con contactos de la Universidad de Oviedo y Hunosa.

1 Datos generales

En España, la minería subvencionada del carbón terminó a finales de 2018. A diferencia de Alemania, en España sigue habiendo un reducido grupo de pequeñas explotaciones privadas que se gestionan sin subvenciones y se espera que sigan funcionando después de 2018. La mina de Cerredo, en Degaña, y la de Pilotuerto, en Tineo (Asturias), van a ser modernizadas gracias a una inversión de 80 millones de euros (1) (2). Queda por ver si se mantendrá la producción en estas explotaciones en un futuro y de qué manera.

En total, el gobierno de España contribuye con casi 2 200 millones de euros en la eliminación progresiva de la minería subvencionada del carbón en un periodo de 10 años (2011-2021). Con esta cantidad se compensan las pérdidas de las explotaciones hasta 2018 y se cubren los costes derivados del cese o cierre de las mismas. También se pretende crear la base legal para la regulación de la jubilación anticipada de mineros dentro de las medidas de reestructuración y racionalización en curso (3).

2 Proyecto de investigación «Evaluación de los procesos de ascenso del agua de mina»

En el marco del cese de la minería subvencionada del carbón alemana y del ascenso del agua de las minas ocurrida en consecuencia, se inició en 2016 el proyecto de investigación «Evaluación de los procesos de subida del agua de las minas en la región del Ruhr, el Sarre, Ibbenbüren y otras regiones mineras alemanas y países europeos vecinos»

en el Centro de Investigación de Posminería de la THGA. Este proyecto está financiado por la Fundación RAG. En él se pretende desarrollar un conocimiento extenso de las características específicas de cada cuenca y de los resultados obtenidos de los ascensos de agua de las minas que ya han ocurrido o inminentes en toda Europa, con el fin de transferir este conocimiento a los próximos procesos en Alemania. El hecho de que la minería subvencionada del carbón también finalizara en España a finales de 2018 y que se haya producido el cese parcial o incluso total de las medidas de drenaje es un tema principal dentro de los objetivos de la investigación.

La visita a las cuencas de Asturias permitió establecer un contacto personal con expertos españoles de Hunosa y de la Escuela de Minas de la Universidad de Oviedo para así iniciar un intercambio de experiencias y establecer colaboraciones. Se ha informado en varias ocasiones sobre la experiencia adquirida en Alemania y el Reino Unido (4) (5) (6).

3 Cuenas carboníferas de España, evolución histórica y estructura organizativa de la industria del carbón

En comparación con algunas cuencas carboníferas más pequeñas en el suroeste de España (incluida la de «Puertollano») y la pequeña cuenca carbonífera de «La Demanda» en el noreste de Castilla y León, la cuenca de Asturias, situada principalmente en la región de Asturias y en parte del norte de Castilla y León, es, con diferencia, la cuenca carbonífera más importante de España (Figura 1). Durante más de dos siglos, aquí se produjo entre el 50% y el 70% de toda la hulla española (7) (8). En los comienzos de la minería del carbón asturiana, a mediados del siglo XIX, la hulla se extraía principalmente a través de galerías que se introducían en la montaña desde el valle. Más tarde, los filones de carbón más profundos también se explotaron mediante pozos verticales y/o inclinados (7) (9). Por regla general, durante la explotación se mantuvo una distancia de seguridad de hasta 50 m con la superficie para evitar la infiltración del agua de las precipitaciones en la mina. Sin embargo, esta medida de seguridad pronto resultó insuficiente, por lo que fueron necesarias medidas de drenaje (9).

Anualmente, se extrajeron unos 40 millones de m³ de agua de la mina debido a las operaciones en la cuenca de Asturias, también conocida como la «Cuenca Carbonífera Central Asturiana», que cubre un área de aproximadamente 1 400 km² (7). Esto corresponde a un flujo de entrada medio diario de unos 78 m³/km². Así, el caudal en Asturias se sitúa más bien en el extremo inferior de la tabla publicada por ADAMS & YOUNGER (1999) (10) Los valores habituales son, por ejemplo, 300 m³/(km²/d) en la cuenca de Durham (Reino Unido), 600 m³/(km²/d) en la cuenca de Dysart-Leven (Reino Unido) y de 200 a 300 m³/(km²/d) en la cuenca del Ruhr (calculados según datos de (11)).

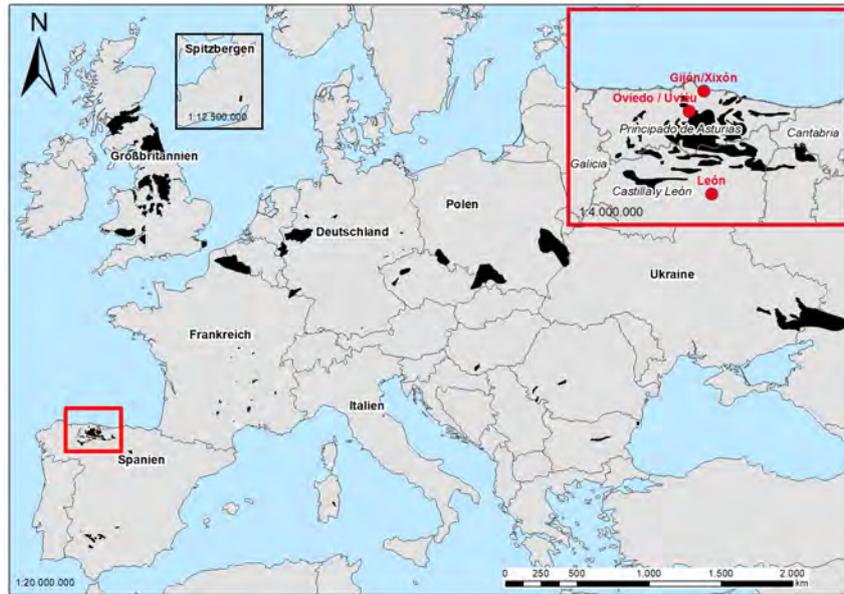


Figura 1: Panorama geográfico de las cuencas carboníferas de Europa. La imagen muestra la ubicación exacta y la distribución de las cuencas de Asturias y León (Ländergrenzen © OpenStreetMap).

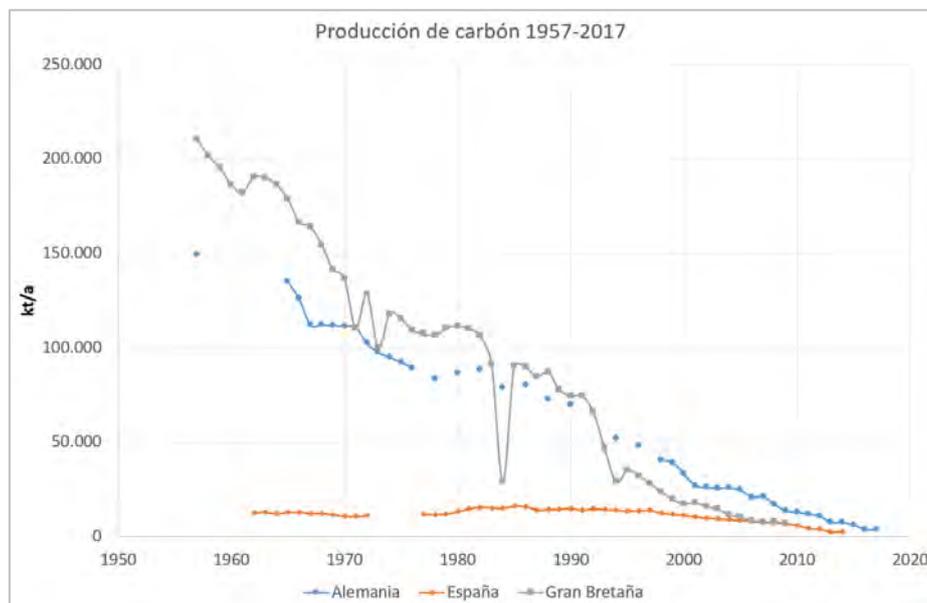


Figura 2: Comparación de la producción de hulla en Alemania, España y Reino Unido entre 1957-2017. Se puede apreciar el drástico corte en Reino Unido debido a la huelga de mineros en 1984/1985. Datos según (14) hasta (20).

En España, la explotación de hulla ha disminuido considerablemente en los últimos años, al igual que en países como Alemania y el Reino Unido (Figura 2). Aunque en la década de los 80 se extrajo temporalmente un máximo de 16 millones de toneladas de hulla, la cantidad anual extraída descendió a 11,3 millones de toneladas en el año 2000 y a 2,7 millones de toneladas en 2014. En este contexto, el número de empleados también disminuyó de 45 340 en 1985 a 14 592 en 2000 y, más recientemente, a 3 324 en 2015 (12) (13) (14) (Tabla 1).

Tabla 1: Comparación de la evolución de la mano de obra en la industria del carbón en España, Alemania y Reino Unido. Datos según (12) hasta (14).

Países	2008	2010	2012	2015
España	8.200	5.400	3.400	3.324
Alemania	31.200	24.200	17.600	9.640
Reino Unido	6.100	6.000	5.800	1.975

Hasta 1967, eran sobre todo las minas pequeñas las que producían hulla en España. En total, el sector hullero se dividió en 131 empresas. En 1967, con la ayuda del gobierno de España, los 15 productores de hulla más importantes se agruparon en la organización HUNOSA (Hulleras del Norte, S.A.), que entonces producía alrededor del 50% de todo el carbón español (15). HUNOSA formaba parte del Instituto Nacional de Industria (INI), fundado en 1941 como instrumento de política industrial para reforzar las aspiraciones autárquicas del régimen franquista. Así se creó una especie de holding estatal para la industrialización de España, que tenía la misión de estabilizar industrias importantes como la minería, el suministro de energía y gas, la industria petrolera, la producción de metales, la construcción de vehículos y aviones, etc. Cuando se fundó HUNOSA, el INI tenía el 76,92% de las acciones y unos años después controlaba el 100%. En 1995, el INI se disolvió y fue asumido por la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI). HUNOSA sigue formando parte de SEPI en la actualidad (16).



Figura 3: La mina de Pozo Sotón, en Asturias / España, cerrada en 2014. Las placas conmemoran a los mineros que murieron bajo tierra. La ubicación de la mina se muestra en la imagen 4 (Foto: Bastian Reker).

Como parte del viaje, se visitó la mina de Pozo Sotón, que estuvo activa hasta 2014 y cuyo equipamiento técnico se califica de poco moderno. Como la mina está conectada a otras minas que siguen activas, se siguen llevando a cabo medidas de drenaje. Todavía no se ha aclarado qué pasará con el nivel de bombeo tras el cese de la producción en las minas conectadas.

3.1 Panorama geográfico de Asturias

Asturias es una comunidad autónoma situada en la costa norte de España. Su nombre oficial es Principado de Asturias. Con una superficie de unos 10 600 km² y unos 100 habitantes por km², es una provincia bastante pequeña dentro de España, con una densidad de población baja o media. La capital, Oviedo, está situada en la zona central de la provincia (Figura 4) y es la segunda ciudad más grande de la comunidad, con unos 220 000 habitantes. La ciudad más grande, Gijón, está situada en la costa (Costa Verde) y tiene más de 270 000 habitantes. La parte meridional de Asturias está definida por las estribaciones septentrionales de la Cordillera Cantábrica, que también actúa como divisoria climática entre la parte septentrional de España, de clima oceánico, y la meseta central española, cálida y seca (Meseta Ibérica). En consecuencia, la vegetación se diferencia claramente de la de las zonas más meridionales del país, lo que también queda patente en la expresión «La España Verde».

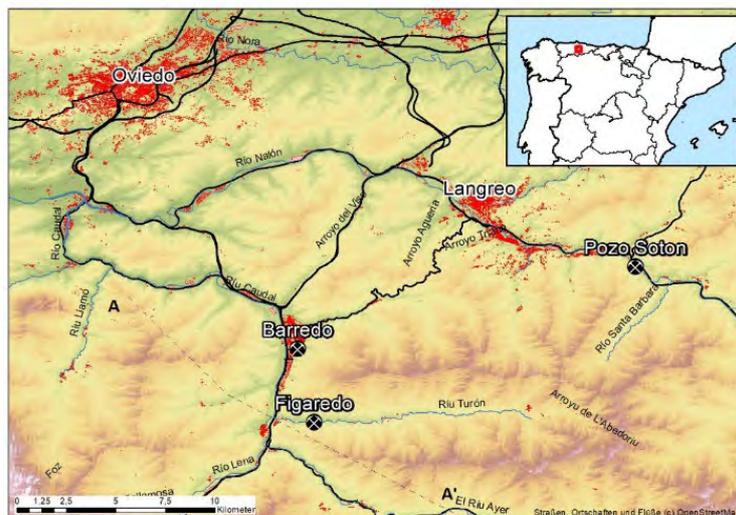


Figura 4: Ubicación geográfica de las minas visitadas. La sección transversal de la Figura 5 se indica con A-A' (© OpenStreetMaps).

3.2 Desarrollo geológico del norte de España

Una peculiaridad de los yacimientos de carbón asturianos son los filones de carbón, muy empinados y casi verticales, que dificultan la extracción y solo permiten una mecanización parcial (21) (22). La razón de esta empinada formación radica en el complejo pasado tectónico de la Península Ibérica. Como la mayoría de las cordilleras bajas europeas, la Cordillera Cantábrica es testigo de la colisión de los dos grandes continentes

Gondwana y Laurasia, desde el periodo Devónico hasta el Carbonífero (23). Este acontecimiento se conoce como la formación de las montañas variscas. El papel que desempeñó el macizo ibérico en la colisión de estos continentes sigue siendo objeto de investigación. Sin embargo, hoy en día se cree que tras la formación de las montañas variscas la Península Ibérica continuó girando y desplazándose en sentido contrario a las agujas del reloj (24). En 1927, Kukuk ya señalaba (25) que las deformaciones de los filones no podían explicarse únicamente con la orogenia varisca. Se intuye entonces que en la posterior orogenia alpina del Terciario se formó el sistema montañoso de los Pirineos, al este de Asturias como parte de la zona de cabalgamiento surpirenaico, y esto dio lugar a un alto esfuerzo tectónico, seguido de un plegamiento más acusado de los estratos carboníferos asturianos (26). Prueba de ello es, por ejemplo, la ausencia de estratos posteriores al Carbonífero, pues se han erosionado como resultado de nuevos levantamientos en toda la zona. En la figura 5 se aprecia claramente la inclinación de los estratos en Asturias.

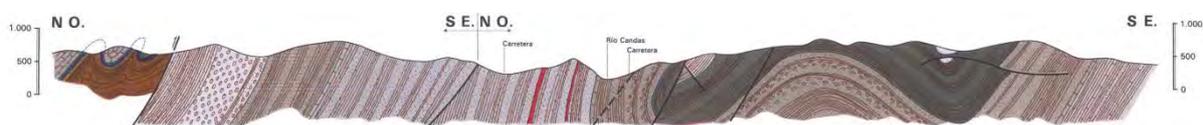


Figura 5: Sección transversal de noroeste a sureste en Mieres / Asturias (de Mapa Geológico 50 Mieres, Nr. 53, Pág. 13-5 (27)). Los estratos de color oscuro en la parte derecha de la imagen corresponden a filones del Carbonífero. Escala vertical y horizontal 1:50 000. Para la posición de la sección, véase la línea de la Figura 4 (A-A' = NO - SE).

3.3 Panorama geológico de la cuenca asturiana

Asturias, o, mejor dicho, el yacimiento conocido como Cuenca Carbonífera Central Asturiana (CCCA), se encuentra en la parte central de la unidad paleozoica de España y forma parte de la zona cantábrica. En total, la zona tiene una extensión de unos 1 400 km² (7). La secuencia sedimentaria comienza en horizontal con calizas del Namur (Carbonífero), que pertenecen a la formación «Caliza de Montaña». Por encima se encuentran calizas, lutitas y areniscas del Carbonífero en serie improductiva, resumidas en el Grupo Lena (Carbonífero Pensilvánico Temprano) y que alcanzan un espesor de hasta 3 500 m (26). Los sedimentos del grupo «Sama», en los que también se depositaron los filones de carbón extraídos se encuentran en el recubrimiento del grupo Lena (29). Este grupo está formado principalmente por lutitas, areniscas, filones de carbón intercalados y bancos de piedra caliza, así como por conglomerados extendidos localmente. Este grupo alcanza un espesor de hasta 3 000 m en su formación total (7). En su conjunto, la Cuenca Carbonífera Central es la mayor unidad geológica de España con sedimentos carboníferos aflorantes y el yacimiento de carbón más importante de España (9).

3.4 Hidrogeología de las cuencas asturianas

Una característica hidrogeológica notable de la cuenca asturiana es la ausencia casi total de acuíferos importantes.

Los sedimentos del Carbonífero se componen principalmente de pizarra y limolita. Estos tienen coeficientes de permeabilidad que varían entre bajos a muy bajos (10^{-7} m/s en estado inalterado y 10^{-6} m/s en zonas alteradas (28)). También se componen de areniscas ricas en caliza y sílice, además de conglomerados con una permeabilidad superior elevada a una potencia diez veces mayor. En total, se trata en teoría de un sistema acuífero multicapa, cuyos niveles individuales están formados principalmente por las capas de arenisca intercaladas. Estos horizontes están separados por capas originalmente selladas de pizarra y filones de carbón. Sin embargo, debido a las hendiduras causadas por la minería, esta propiedad de sellado se ha perdido en su mayoría, permitiendo así el flujo vertical de agua. En la tabla 2 se percibe el cambio de las características hidrogeológicas como consecuencia de la explotación minera en esta zona.

Tabla 2: Cambio en las características hidrogeológicas debido a la actividad minera (zona de Aller, Asturias); según (9).

Porosidad (%)		Coeficiente de almacenamiento		Permeabilidad (m/d)		Transmisibilidad (m ² /d)	
no alterado	alterado	no alterado	alterado	no alterado	alterado	no alterado	alterado
1	>10	$10^{-3} - 10^{-4}$	10^{-1}	10^{-1}	100	10	1000
				($\approx 10^{-6}$ m/s)	($\approx 10^{-3}$ m/s)		

4 Ascenso del agua en las minas clausuradas de Barredo y Figaredo

Ambas minas están situadas en la Cuenca Carbonífera de Asturias, pocos kilómetros al sur de la ciudad de Oviedo (Figura 4). La explotación del pozo Barredo tuvo lugar entre 1926 y 1993, mientras que en la mina de Figaredo duró desde mediados del siglo XIX hasta 2007. Ambas minas están conectadas de manera hidráulica por sendas. Existen más conexiones con otras minas, pero según los resultados de investigaciones recientes, estas ya no están operativas desde el punto de vista hidráulico (7). La información básica de las dos minas se resume en la tabla 3.

En otras palabras, el ascenso del agua de mina depende en gran medida de dos factores: del volumen de agua que fluye en las labores de la mina y del volumen de huecos del subsuelo. No obstante, detrás de esta sencilla correlación se esconden procesos complejos y parámetros muy difíciles de comprender. Cuantificarlos con la mayor precisión posible determina si una simulación del ascenso del agua de mina tiene sentido y si se corresponde con la realidad o no. A continuación, se utilizarán las investigaciones y resultados de Ordóñez et al. (7) para mostrar cómo se realizó la simulación del ascenso del agua en los pozos Barredo y Figaredo como parte de la cuenca minera asturiana.

Tabla 3: Información básica de los pozos Barredo y Figaredo; según (7).

Nombre:	Barredo		Figaredo
Superficie del terreno (m.s.n.m):	+ 220 m		+ 254 m
Máx. Profundidad (m.s.n.m):	- 140 m		- 396 m
Periodo de explotación:	1926 – 1993		Mitad del s. XIX - 2007
Fin del drenaje:	Traspaso a Figaredo		2007
Profundidad del canal de conexión (m.s.n.m):		- 135 m	
		- 29 m	
		+ 23 m	
Superficie:		16,41 km ²	
Ø Volumen de agua ascendida 2002-2007:		11.233 m ³ /día (4,1 millones de m ³ /año)	
Caudal medio correspondiente por km ² :		685 m ³ /día (0,25 millones de m ³ /año)	

4.1 Cálculo del volumen de flujo

Desde un punto de vista geológico e hidrogeológico, el agua que fluye hacia las minas Barredo y Figaredo debe tratarse de agua de infiltración que viene de la superficie (30). Si se conoce el volumen se puede calcular el caudal total multiplicando la zona de captación por el valor del agua infiltrada.

Puesto que la roca asturiana se considera en su mayoría impermeable, es decir, que apenas puede haber infiltración, ORDÓÑEZ et al. (7) determinaron la cuenca zona de captación en función de la superficie afectada por la subsidencia minera. Las diaclasas y las zonas con fracturas que allí se producen hacen que el agua se infiltre en el subsuelo. En total, los autores determinaron una superficie de 16,41 km². Estos cifran la precipitación efectiva en una media de 577 mm, de los cuales el 23% se infiltra en el subsuelo.

Siguiendo los registros del volumen de agua ascendida, se pudo, además, determinar una constante subida de agua, incluso en los periodos secos. Las mediciones de nivel del río Turón por encima y por debajo de la zona de extracción presentaron una diferencia de unos 5 300 m³ al día. Por lo tanto, el agua debe filtrarse por la vía del cauce. Junto con este flujo (constante), se pudo calcular una infiltración anual de unos 4,1 millones de m³, que se corresponde muy bien con el ascenso de agua anual real. La bibliografía no indica en qué medida esta cifra incluye también el agua bruta.

Un aspecto interesante en este caso es que este flujo puede considerarse constante durante todo el período de inundación, ya que no hay flujo de aguas laterales que puedan ser extraídas hidráulicamente a medida que el nivel del agua de la mina aumenta. Por otra parte, en muchas cuencas se presupone una disminución gradual del flujo de entrada en las labores mineras, para lo que también se han desarrollado modelos matemáticos (31). Esto demuestra muy claramente la importancia de la atención especial a la geología y la hidrogeología de la región para elaborar la modelación.

4.2 Cálculo de los volúmenes de huecos

Como ya se ha mencionado, la determinación de los volúmenes de huecos del subsuelo es un parámetro esencial dentro del desarrollo de la subida del agua de la mina. Lo importante no es solo el valor absoluto, sino la distribución de estos volúmenes en función de la profundidad. El requisito para un cálculo específico de estos huecos es el análisis detallado de los planos correspondientes, si es que existen. De lo contrario, si el material cartográfico con el que se cuenta está incompleto, solo se podrán realizar estimaciones aproximadas, por ejemplo, partiendo de los tonelajes de carbón y roca estéril extraídos. Por ello, una clasificación que dependa de la profundidad puede resultar problemática.

En el caso de los pozos Figaredo y Barredo, ORDÓÑEZ et al. (7) determinaron los volúmenes de huecos según profundidad analizando los planos a partir de 1970. Se tuvieron en cuenta las diferentes secciones transversales de las galerías, los lugares de relleno y los pozos, así como la convergencia de las galerías excavadas. El volumen de roca extraído se determinó sobre la base del método de extracción documentado en los planos. A continuación, se calculó el volumen de huecos restantes multiplicando el volumen de carbón extraído por un factor. Este factor de extracción indica qué cantidad del volumen original del carbón extraído sigue sirviendo de volumen de huecos en la inundación tras el fin de la extracción y cuánto depende del método de extracción. Los valores empíricos son del 10-20% para la explotación sin relleno y del 20-30% para las zonas en las que se han colocado materiales residuales como relleno (puede ser como relleno o que se han desplazado).

4.3 Descripción del ascenso de agua de mina

Todas las actividades mineras, incluidas las medidas de drenaje, se detuvieron en Figaredo en 2007. A partir de ese momento se inicia el proceso de ascenso del agua de las minas en esta región, aunque solo se puede acceder a los datos de finales de julio de 2008 (Figura 6). Para entonces, el agua ya se encontraba a unos -185 m.s.n.m, es decir, a más de 200 m sobre la profundidad máxima de extracción, de unos -400 m.s.n.m.

En un mes, el agua subió unos 50 m, alcanzando el mismo nivel que en Barredo. En Barredo, el nivel del agua se estancó a una altura aproximada de -140 m NN (nivel cero) ya que en este rango de profundidad existía una conexión hidráulica con Figaredo (Tabla 3) y, por tanto, el agua fluía hacia allí a través de este paso. Debido al estancamiento de esta conexión en el otoño de 2008 (Figura 6), el agua subió simultáneamente en ambas minas, siendo los cursos similares, con una diferencia de unos pocos metros. Este es otro

claro indicio de que ambas minas están ampliamente conectadas entre sí de manera hidráulica y, por lo tanto, pueden considerarse como una unidad hidrogeológica. Al final de la fase de inundación, a finales de la primavera de 2009, el agua había subido en ambas minas hasta una altura de unos +150 m.s.n.m, lo que corresponde a un ritmo medio de subida de unos 30 m al mes o, extrapolado a los 12 meses para compararlo mejor, de bastante más de 300 m (-140 m a finales de septiembre de 2008, +150 m en mayo de 2009). Esto sitúa la tasa de aumento en el extremo superior de la escala según los estándares europeos. Las tasas de aumento máximas anuales habituales de los dos primeros años de inundación son, en Reino Unido, -según la cuenca- de 50-70 m (Durham y Northumberland, con recubrimiento), 30->100 m (Yorkshire y Derbyshire, sin recubrimiento), 50-100 m (East Fife, sin recubrimiento), 300-400 m (Lorena, con recubrimiento) para Francia, y 470 m (Westfeld Ibbenbüren, extrapolado a 12 meses), ca. 150 m (Königsborn, con recubrimiento) y 200 m (Warndt).

La comparación entre el curso real y la modelación (línea verde en la Figura 6) muestra que la determinación precisa de los parámetros subyacentes a esta (los flujos y la distribución de los volúmenes de huecos) fue esencialmente exitosa.

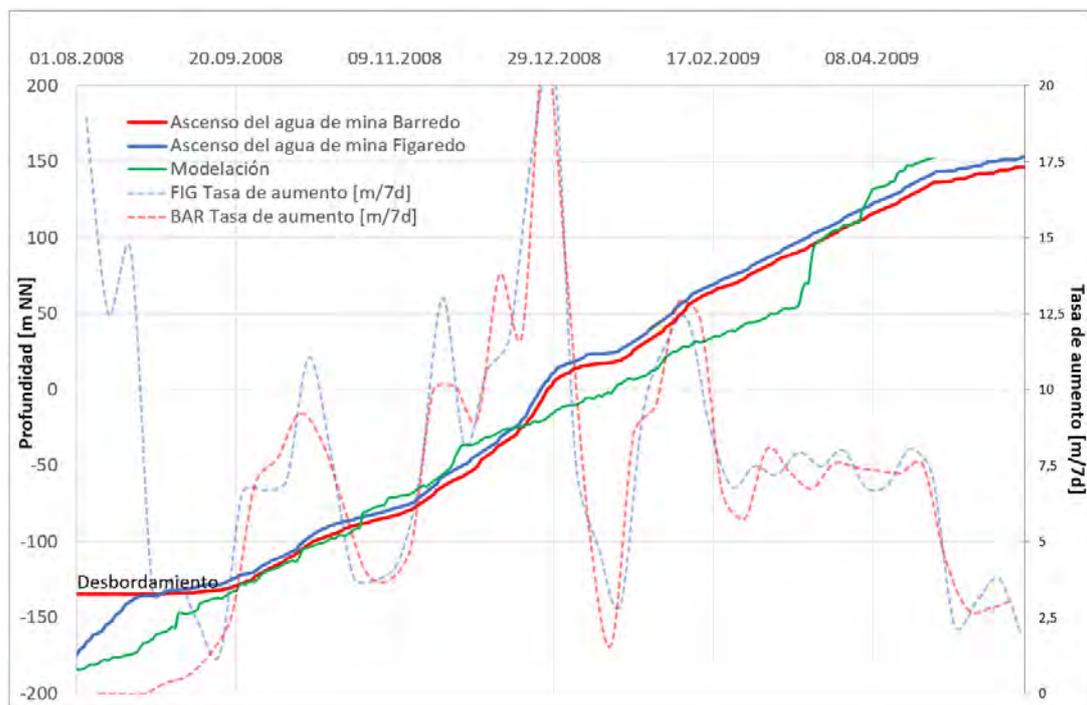


Figura 6: Ascenso de agua de mina medido y tasas de aumento en Barredo (curva roja) y Figaredo (curva azul), así como los resultados de la modelación (curva verde). Datos reproducidos de (7).

5 Aprovechamiento posterior dentro del periodo «posminero¹»: depósito artificial de agua potable

Como ya se ha mencionado, no existen acuíferos importantes en las cuencas mineras de Asturias. Gran parte del suministro público de agua de Asturias procede del embalse de Rioseco. Por lo tanto, es concebible utilizar los huecos de la explotación existentes como un acuífero artificial. En lo que respecta al potencial cambio climático, esto sería una gran oportunidad para que zonas en todo el mundo con un suministro de agua potable complicado pudieran asegurar y regular su suministro de agua potable de esta manera.

Por este motivo, tanto JARDÓN et al. (8) como ORDÓÑEZ et al. (7) recomiendan el uso de las dos minas como depósito artificial de agua potable. Con un caudal medio de unos 4 millones de m³ al año en los pozos de Barredo y Figaredo, se podría abastecer a 60 000 personas más cada año si se regulase el volumen de extracción diario (con un consumo medio de unos 185 l al día). La regulación es necesaria para que la formación estacional de nueva agua potable y la extracción de agua se mantengan en equilibrio durante todo el año.

Además de asegurar el suministro público de agua, otro valor añadido podría ser el de suministrar suficiente agua a los cauces durante los periodos de sequía, de modo que se mantenga un nivel ecológico mínimo. Especialmente en el contexto del largo periodo de sequía del verano de 2018, esta sería una opción interesante para cauces de desagüe más pequeños.

Independientemente del uso que se haga del agua de mina, se debe realizar un seguimiento de la hidroquímica. Así pues, cabe esperar que se produzcan restricciones con el fin de medir la calidad del agua en la zona estudiada. Debido a las excesivas concentraciones de hierro, manganeso, sodio y sulfato, se hace necesario el tratamiento del agua para cumplir con los máximos permitidos para el agua potable. Además, se debe comprobar en qué medida influyen en la calidad del agua los residuos y materiales de explotación que permanecen en el subsuelo.

6 Aprovechamiento posterior en el periodo posminero: energía geotérmica

En cuanto a la producción ecológica de electricidad a partir de las llamadas «energías renovables» y a su optimización (aumento de la eficiencia), la tecnología actual de bombas de calor tiene un gran potencial para el aprovechamiento de la energía geotérmica del agua de las minas para la climatización de edificios. Por regla general, el agua de las cuencas carboníferas europeas tiene una temperatura media superior a los 14°C (8). Con esta temperatura se puede obtener energía térmica a gran escala a partir de esta

¹ N. de T.: Se utilizan los términos «posminera», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

«materia prima», usando la tecnología actual de bombas de calor. Por consiguiente, esta tecnología ofrece la posibilidad de ahorrar grandes cantidades de combustibles fósiles y de CO₂.



Figura 7: Estación de bombeo e intercambiador de calor sobre el pozo Barredo (Foto: Bastian Reker).



Figura 8: Sistema geotérmico en el edificio del centro de investigación (Foto: Bastian Reker).



Figura 9: Un posible inconveniente del sistema de control de circuito abierto: la obstrucción en una placa extraída (mitad derecha de la imagen) del intercambiador de calor (izquierda de la misma en azul) en el Centro de Investigación Hunosa del Campus de Mieres. (Foto: Bastian Reker).

En el pozo Barredo se realizaron amplios estudios, especialmente a principios de la década de 2010, para evaluar el potencial geotérmico de este yacimiento (7) (8) (9). Ya se han instaurado las primeras instalaciones piloto en el rango de tres dígitos de kW hasta menos de MW, tanto en el edificio del Campus de Mieres (perteneciente a la Universidad de Oviedo y que contiene un centro de investigación de Hunosa, así como una residencia de estudiantes) como en el recién construido hospital adyacente Álvarez Buylla. El agua que fluye a ambas instalaciones se eleva directamente de pozo Barredo, bajo el castillete aún existente (Figura 7). Para la climatización del Campus de Mieres se utilizó un sistema de circuito abierto (*open loop*) (32) con una capacidad de 2 x 362 kW (Figura 8), mientras que para el hospital se eligió una configuración de circuito cerrado (*closed loop*) (33) con una capacidad de 3,5 MW, lo que lo convierte en uno de los mayores sistemas de Europa (34). Durante el funcionamiento de la configuración con el circuito abierto surgen problemas con los altos contenidos disueltos del agua de mina - en el sistema instalado en el centro de investigación, los intercambiadores de calor tienen que limpiarse regularmente debido a los hidróxidos de hierro precipitados (Figura 9) (35). En total, el sistema requiere 251.457 m³ de agua de mina al año para el centro de investigación y 158.022 m³ para la residencia de estudiantes. Las emisiones de CO₂ fueron de unas 113,2 t, lo que corresponde a un ahorro del 68% en comparación con el sistema de calefacción de gas convencional, con 359,5 t de emisiones de CO₂, así como significó un ahorro de costes del 15-20% (34). También se calcula un ahorro de CO₂ del 67% en el equipo instalado en el hospital, así como un ahorro de energía primaria del 62%, acompañada de una reducción de los costes operativos) del 10% (34). En total, la energía térmica utilizable de los 4,1 millones de m³ de agua de mina al año (aproximadamente 0,67 m³/seg) de pozo Barredo asciende a unos 14 MW. Suponiendo un coeficiente de rendimiento (*coefficient of performance/ factor COP*) de 6 para la bomba de calor, una diferencia de temperatura de 15°C y un funcionamiento anual de la calefacción de 1 700 horas, se obtiene una energía térmica potencialmente utilizable de 28,6 GWh. Este valor incluye un consumo de energía eléctrica de unos 4,8 GWh. Si estos cálculos se extienden a toda la cuenca minera asturiana, con un volumen de agua de mina de unos 40 millones de m³ (7), la energía térmica potencialmente utilizable se multiplica por diez. Aún no se puede estimar en qué medida estas aguas seguirán estando disponibles para un uso energético práctico tras el cese de la actividad minera y de las medidas de drenaje.

7 Conclusión

La situación de la industria del carbón en España es básicamente muy similar a la de Alemania. La pérdida de las subvenciones gubernamentales está obligando a casi la totalidad de las minas de carbón españolas a cesar su actividad. El gobierno español intenta contrarrestar la consiguiente pérdida de empleo y poder adquisitivo con recursos financieros. Estos recursos financieros se utilizarán principalmente para las medidas de reestructuración necesarias, incluida la financiación de los planes de jubilación anticipada y las medidas de reconversión profesional. Del mismo modo, en España se está

llevando a cabo de forma proactiva un cambio estructural necesario y se están intentando desarrollar industrias alternativas, si bien algunas regiones siguen sufriendo la pérdida de puestos de trabajo (36). La construcción del centro de investigación en el Campus de Mieres por parte de Hunosa se puede considerar parte de este cambio estructural. Las grandes instalaciones geotérmicas, que han avanzado ya desde aquellas instalaciones piloto, son prueba del interés científico de España por los retos de la posminería. En este sentido, uno de los objetivos declarados del Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrums Nachbergbau) es establecer redes y colaboraciones en el ámbito europeo para así iniciar el mayor intercambio posible de experiencias.

En definitiva, demuestra que la subida del agua de mina no solo debe percibirse como un peligro, sino que es mucho más importante reconocer su amplísimo potencial y entenderla como un recurso. El gran potencial geotérmico de las aguas de las minas debería ser, no solo en España o Alemania, sino en toda Europa, una cuestión de especial consideración de cara a la transición energética actual.

Referencias

- (1) Bittner Miningconsult (2017): Bergbaunewsletter 48.KW 2017. - Online: <http://www.mineral-exploration.de/newsletter/miningnewsletter2017-48.pdf> (visitado por última vez el 18/07/2018).
- (2) Hartlieb-Wallthor, P. v. (2018): Spanien – Überblick Kohle und Rohstoffindustrie 2018. - bergbau 6/2018, S. 252-257.
- (3) European Commission (2016): State Aid SA.34332 (2012/NN) – Spain. Aid to facilitate the closure of coal mines in Spain. - Brüssel, 27.05.2016 - Online : http://ec.europa.eu/competition/state_aid/cases/244102/244102_1780173_276_2.pdf (visitado por última vez el: 18/07/2018).
- (4) Reker, B.; Goerke-Mallet, P.; Westermann, S.; Melchers, C. (2018): Die britische Steinkohle und der Nachbergbau: Eindrücke aus dem Revier South Yorkshire und aktuelle Entwicklungen in Großbritannien. - bergbau 69 (6), S. 269-274.
- (5) Goerke-Mallet, P.; Reker, B.; Westermann, B.; Melchers, C. (2017): Nachbergbau in Großbritannien: das Steinkohlenrevier South Yorkshire. - Markscheidewesen 124 (1), S. 13-21.
- (6) Westermann, S.; Dogan, T.; Reker, B.; Goerke-Mallet, P.; Wolkersdorfer, C.; Melchers, C. (2017): Evaluation of mine water rebound processes in European coal mine districts to enhance the understanding of hydraulic, hydro chemical and geomechanical processes. In: Wolkersdorfer, C.; Sartz, L.; Sillanpää, M.; Häkkinen, A. (Eds.): Proceedings 13th International Mine Water Association Congress - Mine water & circular economy. Lappeenranta, Finland, June 25 – 30, 2017. Lappeenranta: LUT Scientific and Expertise Publications, Vol. 1, S. 147-154 (LUT Scientific and Expertise Publications: research reports 63).

- (7) Ordóñez, A.; Jardón, S.; Álvarez, R.; Andrés, C.; Pendás, F. (2012): Hydrogeological definition and applicability of abandoned coal mines as water reservoirs. - Journal of environmental monitoring: JEM 14 (8), S. 2127–2136.
- (8) Jardón, Santiago; Ordóñez, Almudena; Álvarez, Rodrigo; Cienfuegos, Pablo; Lore-do, Jorge (2013): Mine Water for Energy and Water Supply in the Central Coal Basin of Asturias (Spain). - Mine Water Environ 32 (2), S. 139–151.
- (9) Loredó, Jorge; Ordóñez, Almudena; Jardón, Santiago; Álvarez, Rodrigo (2011): Mine water as geothermal resource in Asturian coal mining basins (NW Spain). In: International Mine Water Association (Hg.): Proceedings 2011. Unter Mitarbeit von Christian Wolkersdorfer, Thomas R. Rüde und Antje Freund. 11th International Mine Water Association Congress - Mine Water - Managing the Challenges. Aachen, Germany.
- (10) Younger, P.L.; Adams, R. (1999): Predicting Mine Water Rebound. Environment Agency, R&D Technical Report, W179. ISBN: 1 85705 050 9.
- (11) Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen: Jahresbericht 2016 der Bergbehörden des Landes Nordrhein-Westfalen. Online: https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/j/jahresberichte_bergbehoerden/jahresberichte/jahresbericht_2016_berg.pdf (visitado por última vez el 18/07/2018).
- (12) Carbuñion (Federación nacional de empresarios de minas de carbon): Memoria 2006. - Online: <http://www.carbunion.com/memoria.php?cat=MEMORIA2006> (visitado por última vez el 18/07/2018).
- (13) Carbuñion (Federación nacional de empresarios de minas de carbon): Memoria 2015. - Online: <http://www.carbunion.com/memoria.php?cat=MEMORIA2015> (visitado por última vez el 18/07/2018).
- (14) EuraCoal: Coal industry across Europe. - Berichte/Reports 2005, 2007, 2011, 2013, 2017; Online: <https://euracoal.eu/library/publications/> (visitado por última vez el 18/07/2018).
- (15) Busch, K. (1974): Rohstoffwirtschaftliche Länderberichte - IV Spanien. - Bundesanstalt für Bodenforschung Hannover.
- (16) Hunosa (2018): Online-Auftritt der Hunosa; Online: www.hunosa.es (visitado por última vez el 06/11/2018).
- (17) Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. (2018): Steinkohlenförderung. - Excel Datei online verfügbar unter: <https://kohlenstatistik.de/3-0-Uebersichten.html> (visitado por última vez el 18/07/2018).
- (18) Hill, A. (2001): The South Yorkshire Coalfield - A History and Development. ISBN: 0 7524 1747 9.
- (19) Daniel, M.; Jamieson, E. (1992): Coal production prospects in the European Community. - International energy Agency Coal Research; IEACR/48.

- (20) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1999): XVII Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 1998. – Hannover 1999. ISBN 3-510-95842-X.
- (21) De la Cuadra e Irizar, L. (1976): Der Kohlenbergbau Spaniens. – Glückauf 112 (7), S. 327-334.
- (22) Ziehe, H. (1996): Der Kohlenbergbau in Spanien. – Glückauf 132 (3), S. 115-117.
- (23) Rothe, P. (2000): Erdgeschichte. Spurensuche im Gestein. – WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft). ISBN 978-3534146888.
- (24) Park, G. (2015): Die Geologie Europas. – WBG (Wissenschaftlicher Buchverlag), 2. Auflage. ISBN 978-3-534-26953-2.
- (25) Kukuk, P. (1927): Die asturischen Steinkohlenvorkommen im Gebiet der Kantabrischen Kordillere. – Glückauf 63 (23).
- (26) Gibbons, W.; Moreno, T. (eds) (2002): The Geology of Spain. – Geological Society, London. ISBN 978-1-86239-127-7.
- (27) Caride, C.; Gervilla, M.; Ortuno, G.; Velando, F. (1973): Mapa Geologico De Espana. 1:50.000 no. 53, 13-5 (Mieres). Segunda serie – Primera edicion. IGME.
- (28) Cienfuegos, P.; Loredó, J. (2010): Coalbed methane resources assessment in Asturias (Spain). – International Journal of Coal Geology (83), S. 366-376.
- (29) Sanchez de Posada, L.C.; Marinez Chacon, M. L.; Mendez Fernandez, C.; Menendez Alvarez, J. R.; Truyols, J.; Villa, E. (1990): Carboniferous Pre-Stephanian Rocks of the Asturian-Leonese Domain (Cantabrian Zone). – In: Dallmeyer, R.D.; Martinez-Garcia, E. (1990): Pre-Mesozoic Geology of Iberia. ISBN 978-3642839825.
- (30) Informationen aus der Revierbefahrung und einem Gespräch mit Herrn Juan Jose Alvarez, Geologe der HUNOSA.
- (31) Banks, D. (2001): A Variable-Volume, Head-Dependent Mine Water Filling Model. – Ground Water 39 (3), S. 362-365.
- (32) Banks, D.; Athresh, A.; Al-Habaibeh, A.; Burnside, N. (2017): Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom. – Sustainable Water Resources Management 2017, S. 1-22.
- (33) Colinas, I. G.; Gómez, L. M. L.; Battez, A. E. H.; Rodriguez, J. L. V. (2018): La Innovación Geotérmica, nuevos usos del Agua de Mina. (2. Auflage). ISBN 978-84-16664-93-1.
- (34) Aula Hunosa de la Geotermia y la Biomasa (2018): Offizieller Internetauftritt des Hunosa-Forschungszentrums. Online: www.aulahunosa.es (visitado por última vez el 19-07-2018).
- (35) Informationen aus der Revierbefahrung und den Gesprächen mit Herrn Prof. P. Riesgo, P. Fernando Alvarez und L. M. L. Gomez der Universität Oviedo.

(36) Zuber, H. (2013): Angekündigter Tod. – Der Spiegel 52/2013, S. 88-90.

Publicado por primera vez en: Bergbau 70 (2019) Nr.4, S. 160-166.

Procesos de ascenso del agua de mina en yacimientos carboníferos europeos – Experiencias y Hallazgos

Christian Melchers, Sebastian Westermann, Bastian Reker, Peter Goerke-Mallet

Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Resumen

Desde tiempos inmemoriales, la minería se ha basado en la experiencia, como atestigua el término «Bergbaukunde» (ciencia minera). La experiencia también es de suma importancia para la post-minería. Esto es especialmente cierto en el caso de la gestión del agua de las minas en las cuencas mineras del Ruhr, el Sarre e Ibbenbüren.

Este artículo describe los resultados de la evaluación de los procesos de ascenso del agua de mina en los yacimientos de carbón europeos (Melchers et al. 2019). Para ello, los autores copiaron, evaluaron y valoraron los datos disponibles. Además, se visitaron algunos yacimientos de carbón. A través de estas visitas, se adquirió un conocimiento más profundo de las condiciones regionales; el intercambio con los respectivos responsables y encargados proporcionó una valiosa información sobre las experiencias realizadas y las interrelaciones posteriores a la explotación minera.

El análisis específico del proceso de ascenso del agua de mina es una parte esencial. Se ilustra el proceso como tal y se muestran las relaciones causales. Se explican y definen términos importantes para su comprensión general. Esto se aplica en particular a los términos de agua subterránea, agua de mina y agua potable, así como a los términos que describen el proceso de ascenso de agua de mina e inundación.

Después de muchos años de explotación de carbón en el Ruhr, el Sarre e Ibbenbüren, existe ahora una oportunidad histórica de crear un equilibrio hídrico casi natural en las cuencas carboníferas que se autorregule en gran medida. Con respecto a las generaciones futuras, no solo existe la labor sino también la obligación de hacer que este proceso sea sostenible tanto desde el punto de vista ecológico como económico.

1 ¿Qué es realmente el agua de mina?

En minería y postminería se producen diferentes aguas cuya diferenciación y clara definición son la base para una comprensión común del proceso. Por lo tanto, a continuación se muestran las diferencias entre aguas subterráneas, aguas de mina, agua potable y aguas residuales. (COLDEWEY et al. 2017).

Aguas subterráneas: En función de las condiciones de formación, de su aparición y de las vías de migración, se distinguen diferentes tipos de agua en la corteza terrestre. El término agua subterránea se define según la norma DIN 4049-3 (1994) como «agua subterránea que llena cavidades de la litosfera de forma continua y cuya posibilidad de movimiento está determinada exclusivamente por la gravedad». Se entiende por aguas subterráneas profundas o aguas profundas las «aguas subterráneas de acuíferos profundos», «que, debido a un largo tiempo de permanencia, suelen caracterizarse por un alto grado de mineralización y propiedades reductoras y solo participan en el ciclo del agua en pequeña medida» (DIN 4049-3 1994). En este informe se utiliza el término aguas profundas.

Agua de mina: Ni en las normas alemanas ni en la legislación sobre aguas o minería existe una definición consensuada del término agua de mina. El grupo de trabajo sobre aguas de mina de la Sección de Hidrogeología de la Sociedad Geológica Alemana - Asociación Geológica (Deutsche Geologische Gesellschaft - Geologische Vereinigung DGGV e.V.) ha definido el término como sigue: «El agua de mina es toda el agua que está o ha estado en contacto con minas subterráneas y a cielo abierto. Se trata principalmente de agua natural en forma de filtraciones y aguas subterráneas». Continúa diciendo: «Las denominadas aguas superficiales pueden penetrar directamente en las explotaciones mineras, por ejemplo, a través de las precipitaciones y las aguas receptoras en ausencia de recubrimiento. El agua del recubrimiento/capa puede penetrar en las galerías de la mina a través de las cavidades de los poros, las grietas y el karst, así como a través de las aberturas antropogénicas, por ejemplo, los pozos. Las aguas profundas con una mineralización parcialmente alta (salmuera) pueden fluir hacia las galerías de la mina desde el cuerpo rocoso adyacente y superpuesto (horizontal)». La definición no incluye una declaración sobre la calidad del agua de mina, ya que esta varía mucho en función de la génesis del agua de mina y de la litología a considerar en cada caso.

Agua potable: Según la norma DIN 4046 (1983), el agua potable se define como «agua apta para el consumo y uso humano con características de calidad acordes con las disposiciones legales aplicables».

Aguas residuales: Según el apartado 1 del artículo 54 de la Ley Federal de Aguas (LFA), las aguas residuales son «las aguas cuyas propiedades han sido alteradas por el uso doméstico, comercial, agrícola o de otro tipo y las aguas que escurren junto con ellas en época seca (aguas sucias), así como las aguas recogidas de las precipitaciones procedentes de la zona de superficies edificadas o pavimentadas (aguas de precipitación)».

2 Descripción del aumento del nivel de agua en la mina

El ascenso del agua de mina describe básicamente el aumento del nivel de agua en las labores de la mina resultante de la reducción o el cese de la extracción o de la adición de agua. También se entiende por inundación el proceso de ascenso del agua de las minas a cielo abierto y subterráneas. La inundación incluye tanto el ascenso natural del agua de mina tras el cese o la reducción del drenaje como la inundación activa, en la que se acelera el ascenso del agua de mina añadiendo agua o se mejora la calidad del agua.

Sin embargo, en el lenguaje común, la inundación es un proceso activo, mientras que el ascenso del agua de mina representa un proceso pasivo. La inundación activa aún no se ha llevado a cabo en la industria del carbón alemana y es más común en la minería de lignito a cielo abierto por razones de seguridad.

Una evaluación del ascenso del agua de las minas clausuradas en los yacimientos de carbón europeos muestra una imagen variada de los procesos de ascenso (Figura 1). Esto se debe a la complejidad de las minas en cuanto a la geometría de sus trabajos y a las propiedades hidrogeológicas específicas de la roca circundante. Durante el ascenso del agua de mina en una mina subterránea, intervienen multitud de procesos hidrodinámicos. Éstas, a su vez, están significativamente influenciadas por factores naturales (principalmente hidrogeológicos) y antropogénicos (principalmente mineros). (FERNANDEZ-RUBIO 1979; WESTERMANN et al. 2018). Sin embargo, el análisis de del ascenso del agua de mina en diferentes yacimientos muestra que a menudo se puede hacer una división básica de este ascenso en una fase inicial, intermedia y final (Figura 2).

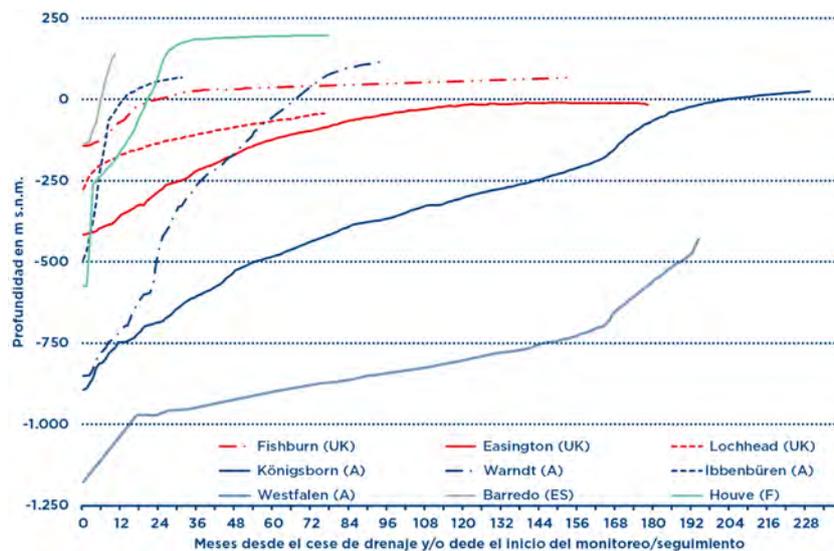


Figura 1: Ascenso del agua inicial en las cuencas carboníferas europeas (Melchers et al. 2019, editado).

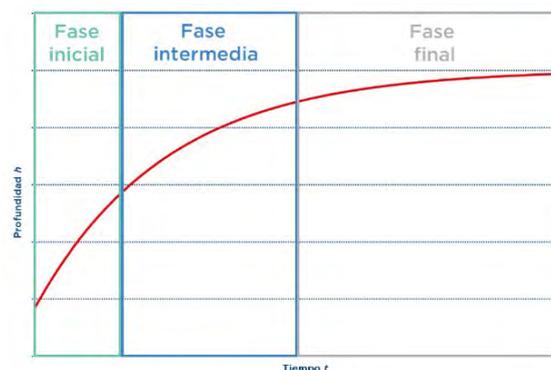


Figura 2: Curva idealizada del ascenso del agua de mina con división de fases. (Melchers et al. 2019, editado).

2.1 Fase inicial

En la fase de explotación de una mina, las zonas situadas por debajo del nivel más profundo (labores subterráneas) se mantienen secas gracias a un gran número de medidas de drenaje temporales y descentralizadas (posiblemente también con bombas aisladas). Dado que el espacio disponible para las explotaciones subterráneas suele estar limitado por la normativa de concesión de licencias, normalmente solo se dispone de un pequeño volumen de cavidad inundable, que se embalsa inicialmente tras el cierre del sistema de drenaje o la reducción de la tasa de producción. (WOLKERSDORFER 2008; ROSNER 2011). Esta fase de ascenso no se puede controlar debido al desmantelamiento de los sistemas de drenaje descentralizados. Dado que la baja columna de agua al principio del aumento del nivel del agua de mina solo provoca una ligera contrapresión hidrostática en los puntos de entrada, las tasas de entrada de agua profunda se incrementan al principio del aumento del nivel del agua de mina. Debido a la combinación de un bajo volumen de cavidad inundable y una mayor tasa de afluencia, el ascenso del agua de mina muestra las mayores tasas de ascenso en la fase inicial, que a menudo pueden ser de varios 100 m/a dependiendo de la geometría local de las labores de la mina (Figura 1). El rápido ascenso (inicial) continúa hasta alcanzar el punto de cruce más profundo.

2.2 Fase intermedia

Cuando se alcanza el punto de cruce más profundo, se produce un vertido dirigido lateralmente a lo largo de los tramos en dirección al drenaje central. A medida que el nivel del agua de mina asciende, los principales niveles de extracción se inundan. El volumen de cavidades creado por la extracción de materias primas suele ser mayor en esta zona. Los flujos de entrada de agua profunda son sucesivamente sobre-elevados hidráulicamente y, por lo tanto, «exprimidos» a medida que el agua de mina asciende, de modo que el flujo total de entrada en las galerías de la mina disminuye y la tasa de ascenso se reduce.

Durante el aumento del nivel del agua de mina, predominan las corrientes en los pozos y las galerías; las corrientes en la roca (saturación) están subordinadas y retrasadas en el tiempo (ROSNER 2011; DENNEBORG et al. 2017). Las velocidades de ascenso suelen ser inferiores a 100 m/a (Figura 1). Cuando la superficie (piezométrica) del agua de mina llega a la zona no penetrada o a la base de un recubrimiento débilmente permeable, las tasas de ascenso en las labores de la mina vuelven a aumentar significativamente debido a la baja inundabilidad de la cavidad. Este aumento de la velocidad de aumento del nivel del agua de mina debido a una capa de baja permeabilidad está documentado, por ejemplo, por el ascenso del agua de la mina de Königsborn (zona del Ruhr, Alemania; Figura 1). Si, por el contrario, se inunda una capa con mayor permeabilidad (por ejemplo, la arenisca roja en Lorena, Francia; Figura 1), la velocidad de ascenso del agua de mina se reduce y la curva de ascenso se aplanan.

2.3 Fase final

El aumento del nivel del agua de mina finaliza en cuanto se alcanza el nivel de la galería de drenaje más profunda o la salida y la entrada de agua están en equilibrio hidráulico. Existen entonces condiciones de flujo cuasi-estacionario.

Si el nivel del equilibrio hidráulico está cerca de la superficie del terreno (o incluso por encima de ella; es decir, condiciones de presión artesiana), no se pueden descartar los fenómenos de saturación del terreno por el agua. Por ejemplo, el agua de las minas de la cuenca de Döhlen, cerca de Dresden-Gittersee (MANN & WEDEKIND 2010) y en la parte occidental de Lorena (Francia).

La curva idealizada del ascenso del agua de mina puede describirse matemáticamente mediante la función de saturación y es aplicable a las minas que están aisladas hidráulicamente de las minas vecinas (Figura 1). La ecuación es la siguiente:

$$\text{con: } h_{\text{Gbw},t} = \Delta h_{\text{Gbw}} \cdot (1 - e^{-\beta \cdot t})$$

$h_{\text{Gbw},t}$: Nivel del agua de mina en el instante t (m s.n.m.)

Δh_{Gbw} : Diferencia del nivel del agua de mina al final y al comienzo del ascenso (m s.n.m.)

β : Parámetro cinético (1/d)

t : Tiempo (d)

Se trata de una función exponencial que describe procesos de crecimiento limitados. La curva de la función aumenta de forma estrictamente monótona. En la forma utilizada está el crecimiento, es decir el aumento del nivel del agua de mina, limitada hacia arriba y degresiva, es decir, la velocidad de crecimiento disminuye continuamente a lo largo del tiempo, en consonancia con el ritmo del aumento del nivel del agua de mina.

Los factores que influyen en el curso espacio-temporal del aumento del nivel del agua de mina se caracterizan por un alto grado de variabilidad y difieren según la mina o la provincia de agua de la mina. Las condiciones hidrodinámicas en la mina subterránea, así como el curso temporal y espacial del ascenso del agua de mina, están determinadas de forma significativa por los siguientes factores de influencia. Aquí se distingue entre factores de influencia geogénica, es decir, naturales, y antropogénica, es decir, técnicos (para una descripción detallada de los factores que influyen, véase MELCHERS et al. 2019).

Los factores geogénicos, es decir, factores naturales que influyen son:

- permeabilidad de la roca y del macizo rocoso,
- volúmenes de poros y superficies de separación,
- tasas de afluencia de agua,
- nivel de la tasa de recarga de las aguas subterráneas,

- espesor y litología del recubrimiento,
- nivel de agua posterior a la extracción (posible influencia antropogénica),
- nivel de las aguas subterráneas en la zona de influencia del ascenso del agua de mina.

Los factores antropogénicos, es decir, factores técnicos que influyen son:

- volúmenes de cavidades creadas por la minería,
- permeabilidad de los trabajos de la mina,
- medidas de control específicas,
- cono de depresión relacionado con la conservación del agua.

3 Zonas carboníferas consideradas en Alemania y Europa

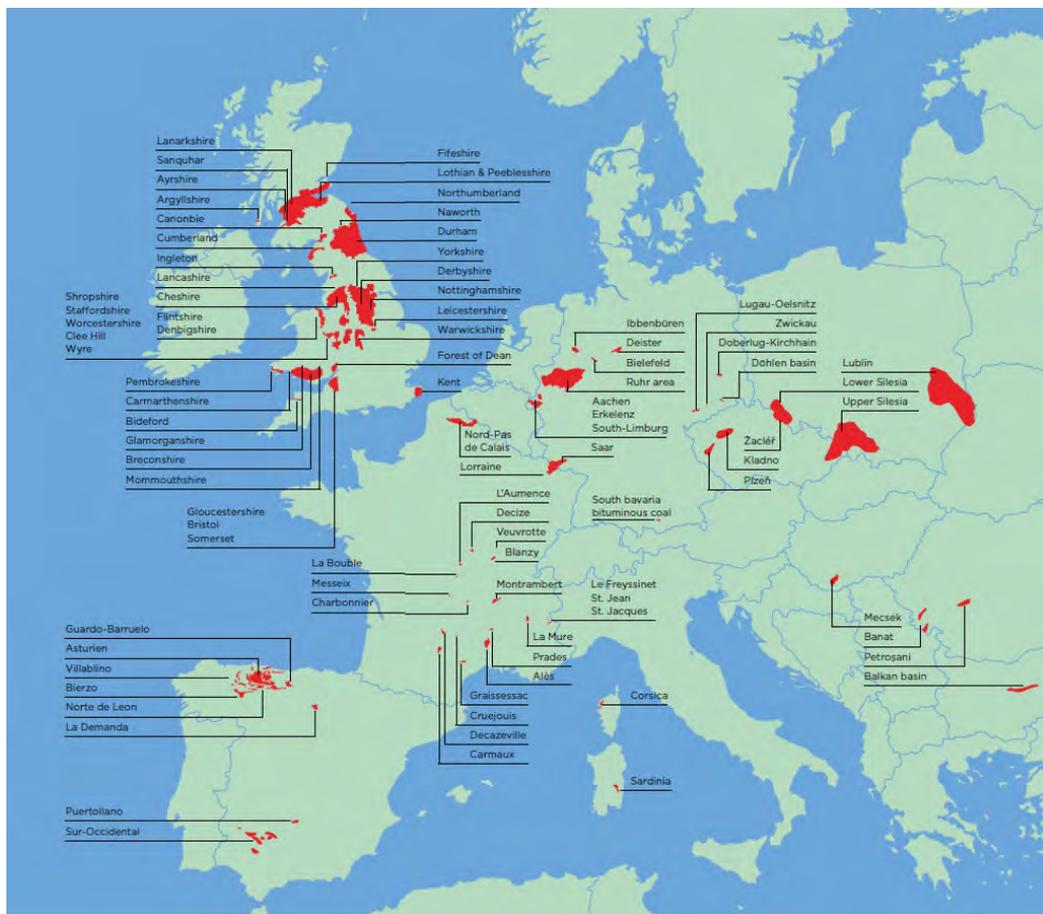


Figura 3: Yacimientos de carbón en Europa (Melchers et al. 2019).

En el transcurso del proyecto para la evaluación del proceso del aumento del nivel del agua de mina (MELCHERS et al. 2019) se examinaron un total de 115 yacimientos de carbón y cuencas carboníferas en 13 países europeos (para una visión general, véase la figura 3). Los yacimientos cubren épocas geológicas que van desde el Carbonífero inferior hasta el Terciario de la brea de carbón (*Pechkohlen*) de Baviera y,

por tanto, unos 360 millones de años de la historia de la Tierra. Los procesos del aumento del nivel del agua de mina más antiguos documentados van desde el comienzo de los años 60, y por tanto, documentan un período de experiencia de más de 60 años.

La mayoría de eventos ocurren en Gran Bretaña, Alemania y Francia (más información: MELCHERS et al., 2019).

4 Experiencias y hallazgos del proceso del aumento del nivel del agua de las minas

A partir de la evaluación de los procesos del aumento del nivel del agua de mina en los yacimientos de carbón europeos, se pueden resumir las siguientes experiencias y hallazgos básicos.

4.1 Aumento del nivel del agua de mina

El proceso de aumento del nivel del agua de mina se ve significativamente influenciado por los factores naturales y antropogénicos antes mencionados. Por lo tanto, para un ascenso del agua de mina controlado, estos factores deben registrarse con la mayor precisión posible. Lo ideal es que la medición se realice durante la fase de exploración, pero sobre todo durante y después de la fase de explotación. Tras el desmantelamiento, dicha medición suele ser difícil.

Cada proceso del ascenso del agua de mina es individual debido a las condiciones específicas del lugar. Sin embargo, los procesos e interacciones básicas son muy comparables. En consecuencia, los procesos de aumento del nivel del agua de mina pueden dividirse básicamente en una fase inicial, otra intermedia y otra final.

Las tasas de ascenso del agua de las minas varían entre unos pocos metros (por ejemplo, la cuenca minera de Lugau-Oelsnitz (aproximadamente 10 m/a) en Alemania) y varios cientos de metros por año (por ejemplo, la mina de Ibbenbüren (Westfeld; unos 500 m/a) en Alemania o la cuenca minera de Lorena (unos 200 m/a) en Francia). En un gran número de minas de carbón alemanas (por ejemplo, el distrito sudoriental del Ruhr, el distrito de Erkelenz, el distrito de Pechkohlen del sur de Baviera), el agua de la mina ya ha subido hasta el nivel freático natural.

Los aumentos del nivel del agua de mina evaluados solo provocaron efectos adversos en el medio ambiente en casos excepcionales. Ejemplos concretos son el distrito minero de Durham, en el Reino Unido, donde las aguas de mina y las aguas subterráneas se mezclaron y la calidad de las aguas subterráneas se vio afectada, y el distrito minero de Erkelenz, en Alemania, donde el ascenso de las aguas de la mina provocó diferencias de levantamientos del terreno en grandes fallas tectónicas que fueron relevantes por los daños ocurridos. No se han documentado otros impactos de esta magnitud en ninguna otra zona minera.

Las previsiones sobre la duración prevista del aumento del nivel del agua de las minas en el pasado se basaban a menudo en períodos demasiado cortos. El ascenso real solía durar más tiempo. A menudo, estas desviaciones se basan en hipótesis simplificadas o en una información insuficiente sobre determinados parámetros en los que se basan las previsiones. A efectos de modelización, los dos factores (los volúmenes de cavidad y la tasa de afluencia de agua en particular) deben registrarse de forma exhaustiva y en relación con la profundidad.

Las incertidumbres en los datos de entrada de una previsión pueden tenerse en cuenta en el sentido de una variante de «mejor caso», «caso neutral» y «peor caso». La previsión puede actualizarse y ajustarse continuamente mediante un programa de seguimiento que acompaña al aumento del nivel del agua de mina. Las medidas de actuación y planificación deben diseñarse siempre para el periodo más corto de la previsión.

4.2 Química del agua de mina

El ascenso de las aguas de mina conlleva una mejora cuantitativa y, a medio y largo plazo, también cualitativa en los puntos de vertido de las aguas de mina en las aguas receptoras. Un mayor nivel de agua en la mina conlleva una reducción de los volúmenes de descarga. Las aguas profundas más mineralizadas se sobrepresionan hidráulicamente y se «estrujan» con el agua de mina en ascenso. Esto reduce la carga de sal geogénica en particular.

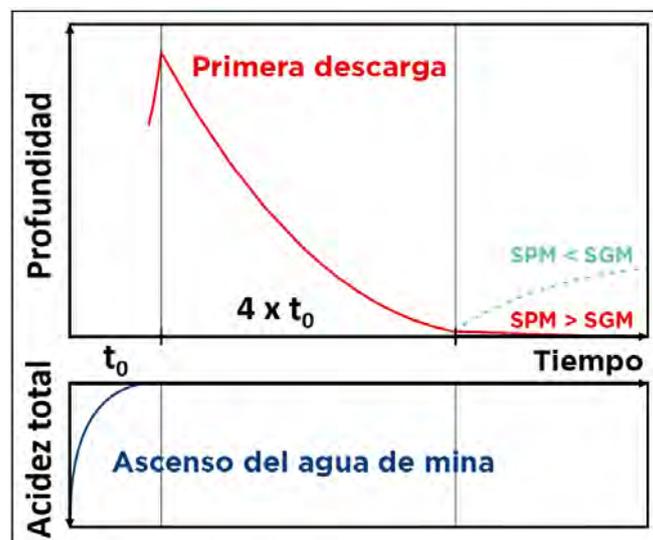


Figura 4: Comparación de la duración del ascenso del agua de mina con la evolución temporal de la acidez total durante y después de la «primera descarga» (ejes adimensionales). SPM: fases minerales neutralizadoras de ácidos, SGM: fases minerales generadoras de ácidos, modificadas y ampliadas según Wolkersdorfer & Younger (2002).

En el transcurso del aumento del nivel del agua de mina, en muchos casos se produce un aumento inicial de la mineralización del agua de mina. Esto se conoce como «primera descarga» y, según datos empíricos, suele durar unas cuatro veces más

que el proceso de ascenso (Figura 4). En el caso de un ascenso rápido, las concentraciones iniciales de la sustancia pueden ser significativamente mayores que en el caso de un ascenso lento, pero la duración de la primera descarga disminuye. Sin embargo, la cantidad absoluta de sustancia transportada a lo largo del tiempo sigue siendo aproximadamente la misma.

Si las antiguas zonas mineras están sobrecargadas, se reducirá la meteorización de los (di)sulfuros (pirita, marcasita, pirrotina, etc.) y la acidez de los productos de la meteorización, hasta el punto de cesar en gran medida.

En el caso de una primera descarga de descomposición rápida, si se requiere un tratamiento del agua, es posible cambiar en un periodo de tiempo más corto de sistemas costosos (sistemas activos) a sistemas técnicamente menos costosos y, por lo tanto, normalmente más ventajosos tanto económica como ecológicamente (sistemas pasivos).

El tratamiento del agua de mina se utiliza actualmente en muchos yacimientos de carbón del Reino Unido, Francia (cuenca de Lorena) y Alemania (Ibbenbüren) para reducir la posible contaminación, especialmente las concentraciones de hierro. La mayoría de ellas son plantas de tratamiento de aguas mineras pasivas, que en su mayoría consisten en un sistema de aireación con cuencas de sedimentación y un humedal aeróbico y anaeróbico (en inglés *aerobic or anaerobic constructed wetland*). Estos humedales ofrecen no sólo una ventaja económica, sino también ecológica, ya que la naturaleza dispone de valiosos hábitats para el desarrollo de un alto nivel de biodiversidad. La población suele percibir y utilizar estas instalaciones como zonas de recreo, pero requieren una cantidad de espacio relativamente grande.

En la cuenca carbonífera de la Alta Silesia (Polonia) se está eliminando el cloruro del agua de mina en el marco de un proyecto piloto. Para ello, el agua de mina se trata en varias etapas con pretratamiento, ósmosis inversa posterior y concentración final de la salmuera.

Actualmente se están realizando estudios de viabilidad en Alemania para el tratamiento de las aguas de mina que contienen sulfatos en la zona minera de Ibbenbüren. En la actualidad, el agua de las minas en el distrito minero del Ruhr (minas Robert Müser y Haus Aden) y en el distrito minero del Sarre (Camphausen). Para ello, se añade peróxido de hidrógeno al agua de la mina para reducir químicamente el sulfuro de hidrógeno y eliminar en gran medida la conspicuidad organoléptica (olor a H₂S). Durante las operaciones mineras en el caso de la mina Auguste Victoria (cuenca del Ruhr), se añadía sulfato de sodio al agua de mina debido a la presencia de bario en el subsuelo para precipitar el bario como barita (sulfato de bario, BaSO₄).

El desbordamiento de las zonas más profundas del tajo de la mina conduce a una reducción significativa de las velocidades del flujo. Esto significa que se puede transportar menos materia en suspensión, lo que podría contribuir a la movilización de posibles contaminantes.

En muchas minas (también en todo el mundo), en las que el ascenso del agua de mina se remonta a mucho tiempo atrás, hay pruebas de una densa estratificación en la masa de agua de mina. La densa estratificación causada por las corrientes de convección impide la mezcla, separando así las aguas subterráneas profundas (a menudo más mineralizadas) de las aguas subterráneas cercanas a la superficie (menos mineralizadas), lo que representa una barrera hidrogeoquímica natural.

Una diferencia potencial entre el nivel de agua del tajo y el nivel freático del agua subterránea puede impedir la mezcla de ambas masas de agua. En Gran Bretaña (distrito de Durham) y en Francia (distrito de Lorena), la presión hidroestática del agua de mina se ha mantenido durante años solo unos metros por debajo de la presión hidroestática de las aguas subterráneas sin que la calidad de las aguas subterráneas se viera afectada.

4.3 Movimientos del terreno

El aumento del nivel del agua de mina hace que la superficie se eleve. Las razones son la fuerza de empuje del agua ascendente, así como la absorción de agua y el proceso de hinchamiento asociado de los componentes cohesivos del suelo.

El levantamiento del suelo solo se inicia con un tiempo de retraso después de que se haya cerrado el desagüe. El tiempo de retardo es específico del lugar y depende esencialmente de las condiciones geológicas del yacimiento y de la cantidad absoluta de ascenso de agua de mina que se haya alcanzado.

El levantamiento del terreno se encuentra en el rango de centímetros a unos pocos decímetros (Tabla 1) y, por lo tanto, es mucho menor que el hundimiento del terreno relacionado con la minería. Según los conocimientos actuales, el hundimiento del suelo relacionado con las inundaciones puede ser de hasta 0,5 m, dependiendo del grado de desarrollo.

En la mayoría de los casos, el suelo se levanta de forma homogénea y uniforme en una amplia zona y no provoca desajustes, tensiones o presiones importantes. Por lo tanto no es de esperar que se produzcan daños en la edificación. Éstos sólo se producen si están vinculadas a grandes estructuras geológicas, de sellado hidráulico y de alcance superficial, así como a niveles de terreno relacionados con la minería en los que prevalecen diferentes potenciales de agua de mina en ambos lados, lo que da lugar a diferencias de levantamiento del terreno. Hasta ahora se han documentado pruebas e indicios de diferencias de levantamiento del terreno relevantes para los daños en la zona minera de Erkelenz, en la cuenca de Döhlen y en los yacimientos de carbón de Aquisgrán (toda Alemania) y Limburgo del Sur (Países Bajos).

Las relaciones causales resultan de los procesos del aumento del nivel del agua de mina y el levantamiento del terreno. Los índices de ascenso del agua de mina y las cantidades de levantamiento del terreno se corresponden entre sí. El levantamiento del terreno provocado por las inundaciones puede aumentar a medida que se alcanza la sobrecarga (por ejemplo, en el sur de Limburgo, Países Bajos).

Tabla 1: Resumen de los niveles de levantamiento del terreno del ascenso del agua de minas en las cuencas carboníferas - A: Alemania, PB: Países Bajos, F: Francia, B: Bélgica – ampliado a FENK 1997, de Melchers et al. (2019).

Distrito	Profundidad de extracción (m) por debajo del nivel del suelo	Cantidad de levantamiento de la superficie diaria hasta cm	Fuente
Wittener Mulde (A)	< 440	17	OBERSTE-BRINK 1940
Erkelenz (A)	150 – 800	28	BAGLIKOW 2019
Aquisgrán (A)	< 1,200	10	ROSNER 2011
Ibbenbüren (Westfeld; A)	< 625	10	GOERKE-MALLET 2000
Zwickau (A)	< 1,150	17	FENK 2000
Lugau-Oelsnitz (A)	< 1,200	9	LOBEL & DÖHNER 2010
Cuenca de Döhlen (A)	390 – 650	6	GROSS & WEDEKIND 2006
Königsborn (A)	270 – 1,000	24	HEITFELD et al. 2012
Warndt (A)	< 1,750	20	MELCHERS & DOGAN 2014
Faulquemont (F)	600 – 925	13	BRANCHET & KAISER 2001
Limburgo del sur (PB)	260 – 770	28	ROSNER 2011
Kempen (B)	1,090	0.3 – 2.3 (por año)	MELCHERS & DOGAN 2014
Lieja (B)	< 1,000	0.25 (por año)	MELCHERS & DOGAN 2014

El área de impacto del aumento del nivel del agua de mina puede extenderse más allá del área de impacto relacionada con la minería. Un indicio de los daños en los edificios causados por el levantamiento del terreno relacionado con las inundaciones suele ser un curso lineal de daños que se desarrolla continuamente (distrito de Erkelenz).

4.4 Emisión de gases

El aumento del nivel del agua de mina produce una movilización de gases libres en las galerías de la mina y en las cavidades de la roca. Esto básicamente provoca la migración de gases. La cantidad de gas movilizado corresponde al volumen de la entrada de agua de mina. Esto es comparativamente pequeño en la fase de ascenso inicial en relación con el total del hueco abierto.

La proporción de gas desplazado por el aumento del nivel del agua de mina es pequeña comparada con la proporción de potencial de desgasificación barométrica debido al volumen abierto de las excavaciones de la mina en la fase inicial de ascenso. El potencial de desgasificación barométrica en las explotaciones mineras se reduce sucesivamente a medida que el nivel del agua de mina aumenta.

Después de rellenar las galerías de la mina, así como las estructuras de carbón, se espera que la tasa de liberación de gas alcance un mínimo y el proceso de desgasificación inducido por el agua de mina se pueda considerar completo.

Como han demostrado los experimentos en la Lorena Francesa, pequeñas cantidades de metano se disuelven y se liberan en el agua de mina a largo plazo, incluso

después del final del aumento del nivel del agua de mina. Sin embargo, lo más probable es que esto también implique la metanogénesis bacteriana.

En ninguno de las cuencas carboníferas evaluadas se documentan emisiones críticas debidas al ascenso del agua de mina.

4.5 Planificación

El cierre de una mina, y en particular del aumento del nivel del agua de la misma, requiere de una cuidadosa planificación previa. En el transcurso de la planificación conceptual, deben evaluarse todas las fuentes de información (archivos históricos, dictámenes de expertos, datos de grietas, testigos actuales).

Hasta donde sea posible, los galerías mineras aún accesibles deben ser inspeccionados intensamente antes del inicio del ascenso del agua de mina para determinar las posibles vías hidráulicas del agua.

Siempre deben tenerse en cuenta los conceptos alternativos a seguir en caso de desviaciones de la previsión. En el transcurso del ascenso del agua de mina, los conceptos y planes originalmente desarrollados deben ser continuamente optimizados y adaptados al respectivo estado actual de técnicas y conocimiento.

4.6 Seguimiento

El seguimiento es el proceso sistemático de observación, control y evaluación espacial y temporal de los procesos determinantes del sistema. La tarea de vigilancia es controlar el desarrollo actual de los procesos y operaciones y compararlos con las previsiones. De este modo, se garantiza un sistema de alerta temprana fiable, así como la posibilidad de intervenir en los procesos.

El aumento del nivel del agua de mina debe ir acompañado de un programa de seguimiento que permita conocer sin lugar a dudas el nivel de agua de mina y su calidad en cualquier momento. Para ello, hay que definir los objetivos de seguimiento, seleccionar los métodos apropiados, establecer pautas y sistemas de control, y definir los valores objetivo, de alerta y de alarma y dotarlos de los correspondientes planes de acción y medidas.

Lo ideal es que el seguimiento se realice durante todo el ciclo de vida de la mina y se adapte a los respectivos requisitos específicos. También mejora la comprensión del proceso y el conocimiento de las interacciones.

5 Evaluación de experiencias y hallazgos

De la experiencia y los conocimientos adquiridos pueden extraerse las siguientes consideraciones principales.

5.1 Aumento del nivel del agua de mina

El aumento del nivel del agua de mina es el proceso natural tras el cese de la actividad minera. Básicamente, supone una importante ventaja a largo plazo en las labores de la mina, así como en el yacimiento, en lo que respecta a la calidad y cantidad del agua de mina.

5.2 Química del agua de mina

La calidad del agua de mina está determinada, en particular, por el yacimiento, las afluencias geogénicas y los procesos de reacción del drenado del depósito y la mina. Además, los materiales de extracción y de relleno utilizados pueden perjudicar la calidad del agua de mina.

5.3 Movimientos del terreno

A través del aumento del nivel del agua de mina se producen movimientos en el suelo, sobre todo como resultado de la fuerza de empuje del agua. El alcance de los daños debido a los movimientos del terreno como resultado del ascenso del agua de mina es comparativamente pequeño en relación con los mismos movimientos causados por la minería. Es necesario seguir investigando las interacciones entre el ascenso del agua de mina y los movimientos del suelo.

5.4 Emisión de gases

En ninguno de los yacimientos de carbón considerados se ha documentado la emisión de gases como consecuencia del ascenso del agua de mina. Por lo tanto, la cantidad de gas desplazada por el ascenso del agua de mina es comparativamente baja en relación con la liberación de gas relacionada con la minería.

5.5 Planificación

Se requiere una planificación cuidadosa para un aumento del nivel del agua de mina controlado. Para ello, tiene sentido planificar y ejecutar el aumento del nivel del agua de mina por fases. Para cada fase, deben definirse los correspondientes valores objetivo, de advertencia y de alarma, y proporcionarse alternativas de actuación, así como medidas de comunicación.

5.6 Seguimiento

El seguimiento es el elemento clave para la observación y el control del aumento del nivel del agua de mina y permite comprender mejor los procesos.

6 Conclusiones

El riesgo en el ascenso del agua de mina, es decir, la probabilidad de que realmente se produzcan daños en la magnitud que cabe esperar, son comparativamente bajos en relación con el peligro, es decir el posible impacto negativo. En base a las experiencias documentadas y evaluadas en los yacimientos de carbón alemanes y europeos, el proceso de aumento del nivel del agua de mina es técnicamente controlable.

Agradecimientos

Se agradece especialmente a la fundación RAG por la financiación del proyecto. Además de esto, también expresamos nuestra gratitud a los siguientes compañeros por su valiosa contribución y enriquecedora cooperación: Prof. Dr. Wilhelm Georg Coldewey, Dr.-Ing. Michael Eckart, Dipl.-Math. Holger Kories, Prof. Dr. Dmitry V. Rudakov, Dipl.-Geol. Peter Rüterkamp sowie Prof. Dr. Christian Wolkersdorfer.

Referencias

- BAGLIKOW, V. (2019): Belange von Grundstückseigentümern im Rahmen eines Grubenwasseranstiegs. Vortrag auf der Tagung NACHBergbauzeit in NRW an der THGA Bochum am 7.3.2019, 9 Seiten. Online: https://www.vbhg.de/images/downloads/Dr_Baglikow/Baglikow_-_Belange_von_Grundeigentümern.pdf (visitado por última vez el 17/04/2019).
- BRANCHET, M. & KAISER, R. (2001): Die Einwirkungen der Grubenwasserflutung des Bergwerkes Faulquemont auf die Stabilität der Erdoberfläche. In: DEUTSCHER MARKSCHEIDERVEREIN / BEZIRKSGRUPPE SAAR / ARBEITSGRUPPE FACHVORTRÄGE, SCHRAMM, H.G., KLOY, G., OBER-BERGAMT SAARLAND, OBER-BERGAMT RHEINLAND-PFALZ, UHL, O. & DSK AG (BERGWERK ENSDORF) (Hrsg.): Markscheidewesen, qua vadis? - Mensores fodinarum Augustae Treverorum (in urbe opulentissima) - 43. Wissenschaftliche Tagung des Deutschen Markscheider-Vereins e. V., 26.-29. September 2001 in Trier: 141-154; Dillingen (Krüger). Das Markscheidewesen in der Rohstoff-, Energie- und Entsorgungswirtschaft, 43 = Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen, 20.
- COLDEWEY, W. G., BURGHARDT, D., MELCHERS, C., MEBER, J., PAUL, M., WALTER, T., WESCHE, O., WESTERMANN, S., WIEBER, G., WISOTZKY, F. & WOLKERSDORFER, C. (2017): Glossar Bergmännische Wasserwirtschaft. 1. Aufl.: 78 S.; Neustadt/Wstr. (Arbeitskreis Grubenwasser der Fachsektion Hydrogeologie e.V. in der DGGV e.V. (FH-DGGV)).

- DENNEBORG, M., BERK, W. VAN, KÖNIG, C. M., SCHWARZBAUER, J., RÜDE, T. R. & PREUBE, A. (2017): Gutachten zur Prüfung möglicher Umweltauswirkungen des Einsatzes von Abfall- und Reststoffen zur Bruch-Hohlraumverfüllung in Steinkohlenbergwerken in Nordrhein-Westfalen, Teil 1. Endbericht. XVII + 217 S.; Aachen (ahu GmbH). Online: http://www.umweltauswirkungen-utv.de/gutachten_1_Apr2017Nersatzgutachten_April_2017.pdf (visitado por última vez el 14/02/2019).
- DIN 4046 (1983): Wasserversorgung; Begriffe; Technische Regel des DVGW. Berlin (Beuth).
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Berlin (Beuth).
- FENK, J. (1997): Zeitreihenanalyse für Hebungsprozesse über stillgelegten Steinkohlenbergwerken. In: DEUTSCHER MARKSCHEIDER-VEREIN (Hrsg.): Neue Technologien und Aufgaben in den Geowissenschaften - 41. Wissenschaftliche Tagung des Deutschen Markscheider-Vereins e. V., Bad Neuenahr Ahrweiler, 10.-13. September 1997: 117-122; Aachen (Mainz). Das Markscheidewesen in der Rohstoff-, Energie- und Entsorgungswirtschaft, 41 = Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen, 17.
- FENK, J. (2000): Eine analytische Lösung zur Berechnung von Hebungen der Tagesoberfläche bei Flutung unterirdischer Bergwerksanlagen. Markscheidewesen, 107: 420-422.
- FERNANDEZ-RUBIO, R. (1979): Drainage of coal and lignite mines. In: ARGALL, G.O. & BRAUNER, C.O. (Hrsg.): Mine drainage - Proceedings of the First International Mine Drainage Symposium, Denver, Colorado, May 1979: 492-506; San Francisco (Freeman).
- GROSS, U. & WEDEKIND, C. (2006): Auswirkungen der Flutung auf die Tagesoberfläche im Bereich des Wismut-Bergbaus im Döhlener Becken. In: NIEMEYER, I., SROKA, A. & WITTENBURG, R. (Hrsg.): 7. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 11. und 12. Mai 2006 in Freiberg: 96-110; Essen (VGE, Verlag Glückauf). Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Clausthal, 2006, 1.
- GOERKE-MALLET, P. (2000): Untersuchungen zu raumbedeutsamen Entwicklungen im Steinkohlenrevier Ibbenbüren unter besonderer Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Bergbau und Hydrologie. Dissertation, RWTH Aachen: 226 S.; Aachen (Mainz).
- HEITFELD, M., ROSNER, P. & MÜHLENKAMP, M. (2012): Untersuchungen zu den Ursachen von Geländehebungen bei der Flutung von Steinkohlenbergwerken sowie Bearbeitung von Prognosen für das Ruhrrevier. 3. Bericht. Detailbericht Bergwerk Königsborn. II + 52 S.; Aachen. Unveröffentlichtes Gutachten im Auftrag der RAG AG.

- LÖBEL, K.-H. & DÖHNER, S. (2010): Bergbaubedingte Senkungen und Hebungen in Oelsnitz/E. In: SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (Hrsg.): Geologie und Bergbaufolgen im Steinkohlenrevier Lugau/Oelsnitz: 55-69; Dresden (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie). Geoprofil 3.
- MANN, S. & WEDEKIND, C. (2010): Die Flutung des Wismut-Bergbaus am Standort Dresden-Gittersee unter Berücksichtigung des historischen Steinkohlenbergbaus sowie vorhandenen Altlasten - ein Rückblick. In: MEIER, G., SROKA, A., LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H., TONDERA, D., BUSCH, W, MOSER, P. & MAYER, G. (Hrsg.): 10. Altbergbau-Kolloquium, 04. bis 06. November 2010 in Freiberg: 177-188; Essen (VGE Verlag).
- MELCHERS, C. & DOGAN, T. (2014): Studie zu erfolgten Grubenflutungen in Steinkohlenrevieren Deutschlands und Europas. In: MEIER, G.; SROKA, A.; LÖBEL, K.-H.; KLAPPERICH, H.; TONDERA, D.; BUSCH, W (Hrsg.): 14. Altbergbau-Kolloquium. 06. bis 08. November 2014, Gelsenkirchen. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 300-305.
- MELCHERS, C., WESTERMANN, S. & REKER, B. (2019): Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen im Ruhrgebiet, Saarland, in Ibbenbüren sowie weiteren deutschen Steinkohlenrevieren und dem angrenzenden europäischen Ausland. 130 S., 60 Abb., 5 Tab.; Bochum (Selbstverlag des Deutschen Bergbau Museums Bochum).
- OBERSTE-BRINK, K. (1940): Die Frage der Hebungen bei Bodenbewegungen infolge Bergbaues. Glückauf, 76(18): 249-256.
- ROSNER, P. (2011): Der Grubenwasseranstieg im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier - eine hydrogeologisch-bergbauliche Analyse der Wirkungszusammenhänge. Dissertation, RWT H Aachen: 194 S.; Aachen.
- WESTERMANN, S., RUDAKOV, D. V., REKER, B. & MELCHERS, C. (2018): Ein neuer Blick auf Grubenwasseranstiegsprozesse - ausgewählte Beispiele aus dem deutschen Steinkohlenbergbau. In: MEIER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., BUTSCHER, C., TONDERA, O., BUSCH, W, DZI-URZYNSKI, W & SROKA, A. (Hrsg.): 18. Altbergbau-Kolloquium vom 8. Bis 10. November 2018, IMG PAN, Bergwerk Wieliczka: 61-75; Nossen (Wagner).
- WOLKERSDORFER, C. (2008): Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals, tracer tests, modelling, water treatment. XX + 465 S.; Berlin (Springer).
- WOLKERSDORFER, C. & YOUNGER, P. L. (2002): Passive Grubenwassereinigung als Alternative zu aktiven Systemen. Grundwasser, 7 (2): 67-77, 7 Abb., 2 Tab.; Heidelberg.

Capítulo 3 - Medidas de supervisión

Seguimiento de los procesos relevantes para el balance hídrico en minería mediante teledetección

Kian Pakzad¹, Andreas Mütterthies¹, Peter Goerke-Mallet², Christian Melchers², Chia-Hsiang Yang³, Uwe Soergel³

¹EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster, Alemania;

²Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania; ³Institut für Photogrammetrie, Universidad de Stuttgart, Stuttgart, Alemania

Resumen

En la minería, la interacción con el balance hídrico tiene gran relevancia. Por ejemplo, del cambio en el balance hídrico se puede inferir el impacto de la minería en el área circundante, ya sea o no intencionado. La detección de estos efectos, así como de los consecuentes impactos paisajísticos son cuestiones importantes. Dado que las zonas que hay que supervisar suelen ser extensas y el seguimiento cíclico manual suele ser muy costoso, la teledetección es una opción muy adecuada para el seguimiento de los procesos en dichas zonas. Esta técnica observa los procesos directos en la superficie terrestre. En concreto, se pueden observar varios factores: la teledetección por radar puede utilizarse para determinar los cambios en la humedad del suelo, mientras que los análisis espectrales determinan los cambios en la vitalidad de la vegetación. Mediante la interpretación de los datos multiespectrales es posible detectar nuevas superficies de agua o superficies que han ganado en extensión. Además, existe la posibilidad de detectar y medir los movimientos del suelo provocados por la gestión del agua (por ejemplo, levantamientos debido al aumento del nivel de agua de la mina) con datos de radar interferométrico. La supervisión mediante estos métodos se puede aplicar en superficies más grandes. Los satélites Sentinel-1 y 2 de Copernicus sirven como sensores de teledetección y tienen la gran ventaja adicional de que los datos están disponibles de forma gratuita y operativa durante períodos cortos. El presente artículo describe varios posibles componentes de seguimiento que se han desarrollado en el marco de varios proyectos de investigación.

1 Introducción

El suministro de materias primas es inconcebible sin los procesos mineros. A nivel global, las explotaciones mineras producen anualmente unas 5 toneladas de materias primas *per cápita*. Inevitablemente, esto ocasiona también un impacto en el medioambiente. Para observar, comprender e influir en los impactos, se requieren medidas de seguimiento intensivas a lo largo de todo el ciclo de vida de la minería, siendo el agua un elemento central.

El análisis de las interrelaciones existentes entre la minería y la hidrología reviste especial importancia en relación con el cese de la explotación de minas alemanas de carbón subvencionadas en las cuencas de Renania del Norte-Westfalia y el Sarre (Melchers et al. 2015). Por este motivo, hace unos años se fundó en la THGA (Technische Hochschule Georg Agricola University) el Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería o FZN), por iniciativa de la RAG-Stiftung (Fundación RAG). Entre las actividades que realiza la FZN destaca la colaboración en la gestión de tareas permanentes, es decir, el drenaje subterráneo y de los terrenos pólder. Para lograr una comprensión lo más completa posible del sistema y del proceso se necesita la información procedente de procedimientos de seguimiento eficientes. Las investigaciones realizadas en los últimos años han revelado el gran potencial de la observación terrestre por satélite (Goerke-Mallet et al. 2016). La combinación del componente espacial con el componente *in situ*, favorecida por el programa Copernicus, desempeña un importante papel en este caso. Esto incluye los conocimientos y datos técnicos, así como el resto de información de los sensores (*airborne* o aéreos y terrestres). Todo ello hace posible la representación en alta resolución de los impactos medioambientales de los procesos mineros.

A continuación, se describen los trabajos actuales centrados en el análisis de cuestiones hidrológicas en diferentes fases del ciclo de vida de la mina.

2 Componentes de seguimiento

2.1 Aguas superficiales

A partir de los datos de Copernicus se pueden detectar cambios en las aguas superficiales abiertas. Los siguientes ejemplos se han tomado del proyecto de investigación y desarrollo GMES4Mining (www.gmes4mining.info). La superficie de Kirchheller Heide utilizada para las pruebas está situada al noroeste de la Cuenca del Ruhr. Se utilizó en el marco de GMES4Mining para desarrollar métodos de detección de cambios en las masas de agua y en el contenido del agua del suelo derivados de los movimientos del suelo por procesos mineros.

Las alteraciones en la reflectancia pueden servir para determinar las masas de agua que han sufrido un cambio en la superficie durante el período de observación. Si la reflectividad de ciertas superficies de agua es baja, estas se representan con el valor 1 y las demás con el valor 0. Por lo tanto, las masas de agua presentan valores que se alejan de 0 en el ráster de reflectividad. Las masas de agua que no experimentan ningún cambio en el período establecido, independientemente del tipo (natural o antropogénico, ríos, puertos, lagos, etc.) dan lugar al valor máximo (valor 9 en la figura 1) y se pueden descartar. Las masas de agua que varían (incluidas aquellas afectadas por la minería) están representadas por valores medios en la figura 1. El resultado de estas investigaciones no solo pone de manifiesto la subida del nivel del agua a causa de la actividad minera. De hecho, los expertos pueden utilizar los resultados para determinar qué zonas se deben a la influencia de la minería o a otras causas (por ejemplo, la ampliación de un puerto o el cambio del cauce de ríos).

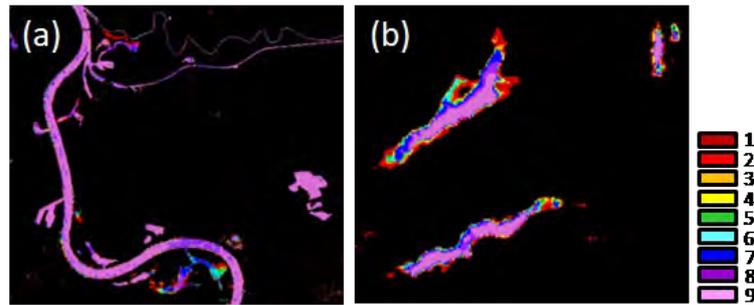


Figura 1: Resultados de la detección de cambios utilizando 9 imágenes de RapidEye entre abril de 2009 y septiembre de 2012 de la cuenca del Ruhr, Alemania (a). Pólder conocido de Kirchheller Heide (b).

La observación indirecta de las fluctuaciones en los niveles de las aguas superficiales y subterráneas se basa, sin embargo, en las alteraciones en la vegetación provocadas por los cambios en el contenido del agua del suelo y la subida del nivel del agua (véase el capítulo 2.2). La aparición repentina de agua en el suelo o, mejor dicho, en las raíces, provoca una apariencia singular de la vegetación afectada, que puede servir para distinguir los lagos de depresión y otras masas de agua. Esta información no se podría obtener simplemente observando la distribución del agua (García Millán et al. 2014).

2.2 Daños en la vegetación causados por la saturación hídrica

GMES4Mining también evaluó el impacto de la saturación hídrica en la vegetación. En el entorno de las superficies de agua afectadas por la minería las plantas suelen perecer, así como se observan árboles con diferentes grados de daños (Figura 2).

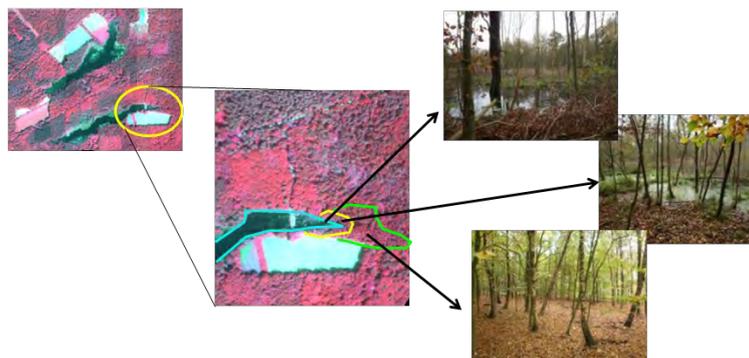


Figura 2: Fases de saturación hídrica en Kirchheller Heide. Imágenes infrarrojas del sensor Airborne AISA-Eagle. Fotos tomadas en octubre de 2012.

Mediante el análisis de los datos hiperespectrales del sensor AISA-Eagle se pueden diferenciar claramente las fases del deterioro de la vegetación (Figura 3). De hecho, el costoso despliegue que se requiere para sobrevolar las zonas puede ser sustituido por los datos de la misión Copernicus Sentinel-2, disponibles de forma gratuita desde 2015. Las líneas verticales de la figura 3 representan las bandas infrarrojas relevantes de Sentinel-2.

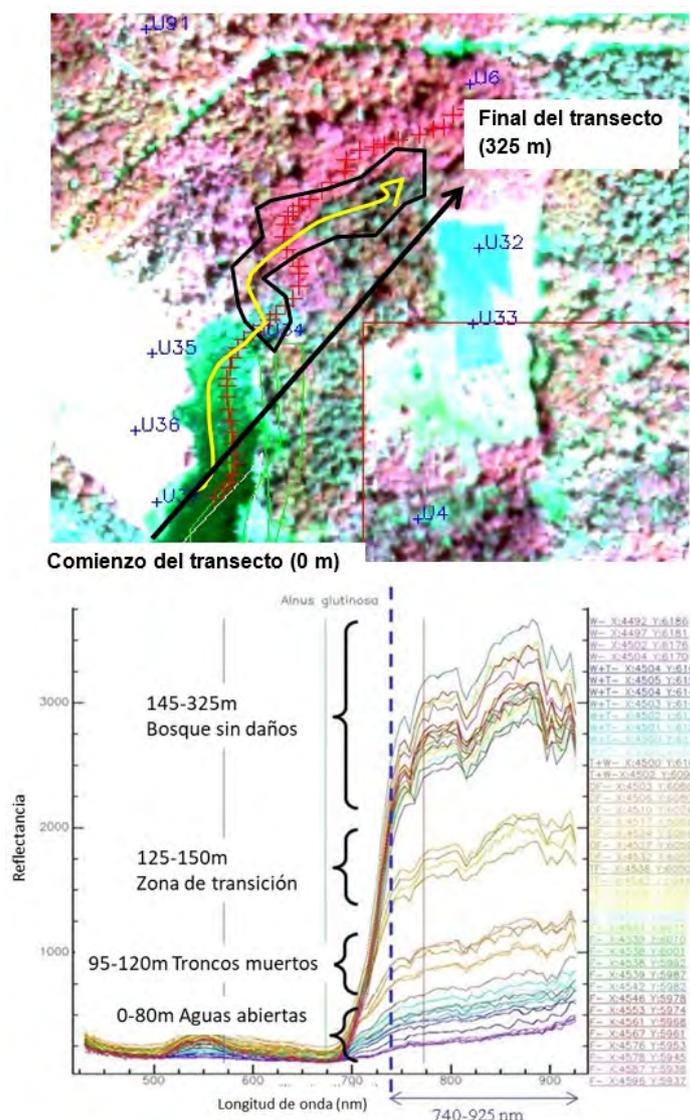


Figura 3: Transecto de daños en la vegetación de la zona de pruebas de Kirchheller Heide, empezando por la superficie de aguas abiertas hasta el bosque sin daños. Los datos de AISA-Eagle representados en la gráfica y las bandas de Sentinel-2 en líneas verticales.

2.3 Información relevante para el balance hídrico a partir de los datos de radar

De entre los satélites Copernicus, Sentinel-1 es un satélite radar idóneo para informar sobre el balance hídrico. En comparación con los satélites de registro óptico, un satélite radar tiene la ventaja de no depender de las condiciones meteorológicas y, por tanto, poderse utilizar incluso cuando está nublado.

La figura 4 muestra una imagen tomada por Sentinel-1 de la presa *Großen Dhünnalsperre*. Esto demuestra que con la ayuda de imágenes de radar es posible determinar el límite entre el agua y la tierra y seguir el curso del cambio de este límite.

En el marco del proyecto de investigación y desarrollo STINGS (eitrawmaterials.eu/project/stings/), se realizaron estudios acerca del seguimiento de balsas de residuos. Las

presas de residuos contienen los residuos de los procesos mineros, que se acumulan en balsas. Debido a los numerosos daños producidos en el pasado en balsas de residuos (rotura de presas, etc.) y que los residuos son, en general, perjudicial para el medioambiente, existe un gran interés en supervisar estos depósitos para detectar posibles inestabilidades en una fase temprana. Para realizar esta actividad, uno de los componentes del seguimiento se apoya en los datos de radar por satélite de Sentinel-1.

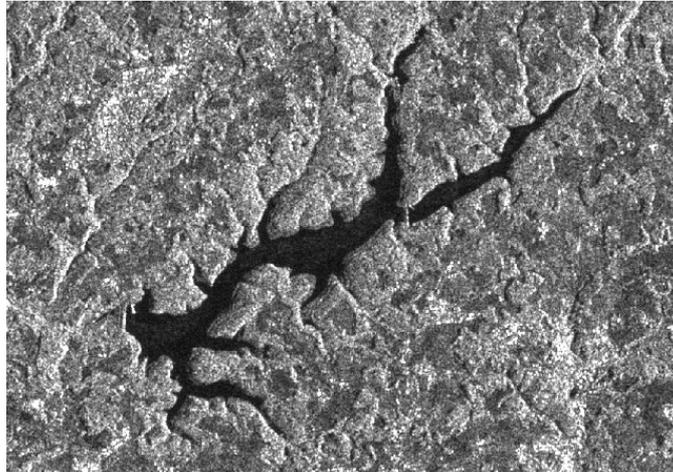


Figura 4: Imagen de radar, Sentinel-1, tomada el 17/10/2017, presa Große Dhünntalsperre.

La figura 5 muestra la mina de cobre de El Soldado, Chile. En la figura se marcan los residuos. Como puede verse, consiste en una presa de arena en el suroeste, que retiene los residuos. En la figura 6 se muestran las capturas de Sentinel-1 de la balsa de residuos, correspondientes a dos fechas con una diferencia de dos años y medio. También se pueden apreciar los cambios en el nivel del agua en las imágenes: en 2017, se puede deducir un aumento del nivel de agua, especialmente en la zona norte (círculo superior), observando la variación del límite entre la tierra y la balsa de residuos.



Figura 5: Imagen de Mina El Soldado, en Chile, tomada el 10/06/2017, señalada: Balsa de residuos (©Google Earth).

Como ya se ha mostrado, el contenido del agua afecta a la señal de retrodispersión de las ondas de radar, aunque hay otros factores que también influyen. Este efecto permite detectar un cambio en la humedad del suelo mediante el seguimiento de una superficie con imágenes de radar. Esto también se puede ver en la figura 6, el rectángulo inferior señala la presa de residuos. El comportamiento retrodispersivo de la señal de la zona deja ver que la presa de arena probablemente tenía en febrero de 2015 un mayor nivel de humedad que en octubre de 2017 (la zona es más oscura). De este modo, es posible detectar los cambios en la humedad del suelo que pueden derivar, por ejemplo, en un anegamiento debido a los procesos mineros.

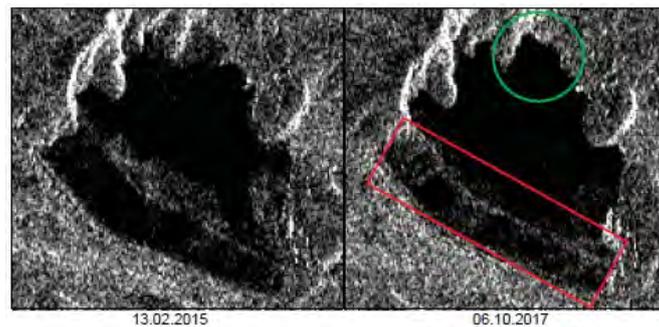


Figura 6: Capturas de Sentinel-1 de la balsa de residuos de El Soldado en dos fechas diferentes.

Además de determinar el límite entre el agua y la tierra y estimar la humedad del suelo, los datos de radar también pueden utilizarse para detectar y medir los movimientos del suelo inducidos por la gestión del agua. Por ejemplo, se pueden medir los levantamientos causados por la subida del nivel del agua de las minas. La figura 7 muestra el caso contrario, es decir, una subsidencia medida en una presa de residuos en Baia Mare, Rumanía.

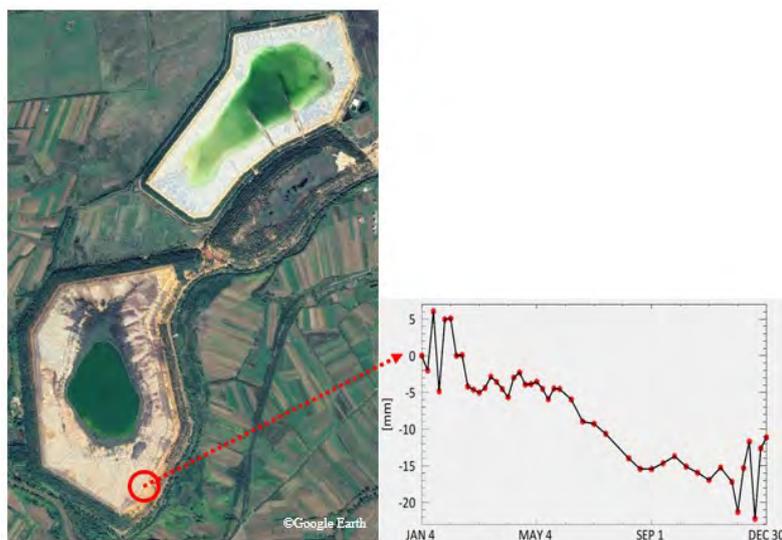


Figura 7: Análisis de la empresa PSI para determinar el movimiento del terreno en la presa de residuos de Baia Mare, Rumanía, para 2017, utilizando 45 capturas de Sentinel-1 (©Google Earth).

Para medir el movimiento del suelo, se aplicó la metodología PSI a 45 capturas de Sentinel-1 (Ferretti et. al. 2001, Kampes 2006). Así, se puede observar una subsidencia minera de 10-20 mm en 2017. En enero y diciembre se observan mayores fluctuaciones en la tasa de movimiento calculada, cuyas causas aún deben examinarse.

3 Perspectivas

En el marco de varios proyectos de investigación en curso, los resultados del seguimiento por satélite se confirman con la información *in situ*. De esta manera, la interpretación de los datos de teledetección irá mejorando progresivamente. El enorme potencial que puede surgir de la combinación de diferentes medidas de seguimiento, diferentes sensores y conocimientos profesionales es, a día de hoy, solo imaginable. Potenciar todo ello es el objetivo de los expertos que trabajan en el desarrollo del conocimiento. Son, pues, de gran importancia, el intercambio profesional y el discurso científico.

Referencias

- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry. *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans.* 39 (1), S. 8-20, 2001.
- Garcia-Millan, V., Mütterthies, A., Pakzad, K., Teuwsen, S., Benecke, N., Zimmermann, K., Kateloe, J., Preuße, A., Helle, K., Knoth, C.: GMES4Mining: GMES-based Geoservices for Mining to Support Prospection and Exploration and the Integrated Monitoring for Environmental Protection and Operational Security. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 02/2014; 159(2): S. 66-73, 2014.
- Goerke-Mallet, P., Melchers, C., Mütterthies, A.: Innovative monitoring measures in the phase of post-mining. *Mining Report* 153, S. 218-225, 2016.
- Kampes, B.: *Radar Interferometry – Persistent Scatterer Technique, Remote Sensing and Digital Image Processing*, vol. 12, Springer, 2006.
- Melchers, C., Goerke-Mallet, P., Henkel, L., Hegemann, M.: Experiences with mine closure in the European coal mining industry: An overview of the situation in Germany, and adjacent regions. *Mine Closure 2015 - Conference*, Vancouver, Canada, 2015.

Publicado por primera vez en: Benndorf, J. (Hrsg.): 19. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 17. und 18. Mai 2018 in Freiberg. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 44-52 (Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg 2018 (1)).

Vigilancia de galerías de drenaje

Peter Goerke-Mallet¹, Peter Hogrebe², Andreas Welz², Christian Melchers¹, Tobias Rudolph¹

¹Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania; ²Bezirksregierung Arnsberg, Abt. 6, Bergbau und Energie in NRW (Gobierno del Distrito de Arnsberg, Dpto. 6 Minería y Energía en Renania del Norte-Westfalia), Arnsberg, Alemania

Resumen

Las galerías de drenaje forman un sistema de desagüe y drenaje subterráneo. Con el objetivo de garantizar la seguridad de la superficie, la conservación de estos sistemas es una tarea vital en muchas regiones mineras del mundo. En concreto, garantizar en estas galerías de drenaje unas condiciones hidráulicas, geotécnicas y mecánicas estables durante un periodo indefinido requiere una comprensión especial de los procesos que tienen lugar en la mina. Un aspecto clave para entender el funcionamiento de las galerías de drenaje reside en la vigilancia del sistema en su conjunto.

Las galerías de drenaje se encargan del drenaje de las explotaciones extensas. Muchas galerías tienen por sí solas varios kilómetros de longitud y, junto con las labores mineras anexas, forman un gran sistema de drenaje de extensión prácticamente desconocida. En estas explotaciones mineras se produce, entre otras cosas, la desconsolidación, la formación de agua estancada, la alteración de las condiciones hidráulicas e hidroquímicas y el vertido de aguas. En la superficie, estos cambios se manifiestan, por ejemplo, en la formación de subsidencias, encharcamientos y brotes de agua espontáneos. La relevancia de estos eventos para la seguridad de la superficie es evidente.

Las galerías de drenaje son estructuras técnicas cuya vida útil suele ser de dos siglos, con una durabilidad posterior medida en siglos. Teniendo en cuenta todas las circunstancias, es necesario detectar las galerías de drenaje de la forma más completa posible.

Junto con el Departamento 6 de Minería y Energía del Gobierno del Distrito de Arnsberg, Renania del Norte-Westfalia, el Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN) ha investigado la situación actual de un gran número de galerías de drenaje sobre el terreno, ha determinado el volumen aparente y los parámetros hidroquímicos, así como ha analizado las zonas de captación. Estas labores sirven para clarificar gradualmente la funcionalidad de las galerías de drenaje como una tarea permanente en antiguas minas, haciéndolas finalmente predecibles e implementándolas en un sistema de gestión de riesgos.

El presente artículo describe las medidas de seguimiento ya realizadas y las previstas para las galerías de drenaje en la zona sur de la Cuenca del Ruhr. Además de las mediciones constantes del caudal de descarga y de los análisis de la hidroquímica del agua de mina, se describen planteamientos metodológicos basados en la teledetección, entre otros, por satélite, así como en el registro sistemático de la geometría de la mina.

1 Introducción

Si se observan los ciclos de vida de los procesos mineros en muchas partes del mundo, las labores mineras verticales y las galerías de drenaje, en particular, tienen una función esencial para la seguridad de la mina. Su gran relevancia para la seguridad de la superficie se documenta en la fase «posminera¹». Las galerías de drenaje suelen formar un sistema de drenaje subterráneo muy duradero (posiblemente eterno) a poca profundidad, cuya extensión por sí sola puede ser de grandes dimensiones. Con una longitud de más de 12 000 m, la galería *Schlebuscher Erbstollen* es una de las galerías de drenaje más largas de la Cuenca del Ruhr. La zona de captación hidráulica de estos sistemas abarca áreas de 50 km² y más.

La información sobre la extensión real de las explotaciones mineras conectadas con las galerías de drenaje la proporcionan los planos mineros y los mapas de la topografía de la mina. Como el proceso de explotación minera se remonta mucho tiempo atrás, estos registros, cuya interpretación requiere considerables conocimientos técnicos, representan un estado de funcionamiento histórico. Los cambios en la mecánica de rocas y otros tipos de cambios están, por naturaleza, indocumentados, y las inspecciones a día de hoy apenas son posibles por razones meteorológicas y de seguridad. De hecho, en muchos casos es casi imposible describir siquiera de forma aproximada el estado de la galería de drenaje, las explotaciones mineras conectadas y el modo de funcionamiento de todo el sistema.

En este contexto y teniendo en cuenta la especial importancia de estas galerías para el drenaje de las minas hasta las regiones mineras, el Grupo de Trabajo sobre Antiguas Minas (AK 4.6), apoyado por la Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) (Sociedad Geotécnica Alemana) y la Deutschen Markscheider-Verein (DMV) (Asociación Alemana de Topógrafos), ha desarrollado la recomendación «Galerías de drenaje, exploración-evaluación-rehabilitación» (ARBEITSKREIS 4.6 ALTBERGBAU 2017).

El Centro de Investigación de Posminería de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) de Bochum lleva varios años trabajando junto con el Departamento 6 de Minería y Energía del Gobierno del Distrito de Arnsberg, de Renania del Norte-Westfalia (NRW) en el desarrollo de un sistema integrado de gestión de riesgos para las galerías de drenaje de la zona sur del Ruhr (MELCHERS et al. 2015; MELCHERS et al. 2016). Tras registrar más de 100 instalaciones, de las que aproximadamente la mitad eran acuíferas, se obtuvieron datos sobre los volúmenes de descarga de agua, la hidroquímica y las áreas de captación. Hace unos meses se puso en funcionamiento un sistema en una galería de drenaje que, además del caudal, registra los parámetros hidroquímicos y la temperatura del agua de mina. Los datos de las mediciones pueden consultarse mediante la telemetría. Para una mejor comprensión de la situación subterránea,

¹ N. de T.: Se utilizan los términos «posminero», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

se creó en el FZN un modelo subterráneo estático y tridimensional de una galería de drenaje y se cruzó con los datos de drenaje. También se analizó un brote de agua en una galería de drenaje. Para ello, se han evaluado conjuntos de datos interferométricos de radar.

Como resultado, se puede afirmar que los acontecimientos en la zona subterránea y, por lo tanto, el funcionamiento de las galerías de drenaje solo pueden registrarse y, en cierta medida, entenderse sobre la base de una comprensión integrada y de medidas de vigilancia adaptadas.

2 Sistema de telemetría de una galería de drenaje

La galería de drenaje *Franziska-Erbstollen* drena zonas de la ciudad de Witten. Hace unos años, se produjo una ruptura cerca de la bocamina que afectó significativamente al funcionamiento de la galería. En consecuencia, hubo que realizar obras de rehabilitación en la galería, descritas en HOGREBE et al. (2016).

Tras finalizar los trabajos para garantizar un drenaje sin anomalías y la seguridad de la superficie, se instaló un dispositivo de medición en la galería por encargo del Departamento 6 de Minería y Energía del Gobierno del Distrito de Arnsberg, de NRW. Con motivo del *Alterbergbau-Kolloquiums 2019* (Coloquio de Antiguas Minas), Hogrebe et al. informan sobre los aspectos técnicos del sistema y la experiencia operativa inicial.

Los datos de los equipos de medida son utilizados por el FZN en combinación con los datos de precipitaciones y transpiración e interceptación en la superficie con el fin de evaluar la infiltración en el área de captación prevista de la galería. Actualmente se está trabajando para perfeccionar el cálculo de la transpiración y la interceptación.

La comparación del volumen de descarga medido con los valores en teoría calculados permite, entre otras cosas, sacar conclusiones sobre la zona de captación, los posibles flujos externos y otros factores influyentes. Estos análisis profundizan en el conocimiento del modo de funcionamiento del sistema de la galería de drenaje y proporcionan información sobre la evolución a lo largo del tiempo de la capacidad de retención, por ejemplo, durante periodos de lluvia intensa.

Esta evaluación de los conjuntos de datos telemétricos representa una base inicial importante para un sistema integrado de gestión de riesgos para las galerías de drenaje.

3 Visualización de una galería de drenaje

Un paso esencial para comprender el estado de una galería de drenaje, su funcionamiento y las medidas de seguimiento adaptadas es analizar la documentación topográfica disponible. La visualización en 3D de la roca, de las labores de la mina y de la superficie permite conocer en profundidad el sistema. Esto ofrece puntos de partida que, entre otras cosas, permiten explicar el comportamiento de descarga de la galería de drenaje como una reacción a la precipitación. Así, en las zonas con bajo recubrimiento o en las

diaclasas se pueden identificar flujos externos a través de, por ejemplo, aguas de infiltración y comprobar con técnicas de medición.

En el marco del tratamiento del sistema de las galerías *Franziska Erbstollen* y *Portländer Erbstollen* cercanas y conectadas, se aplicó el *software* de modelización de yacimientos Petrel y, para este fin, los datos disponibles se convirtieron tridimensionalmente. (Figura 1). Estas galerías están conectadas subterráneamente y drenan en el suroeste a través del curso de agua hacia el Ruhr.

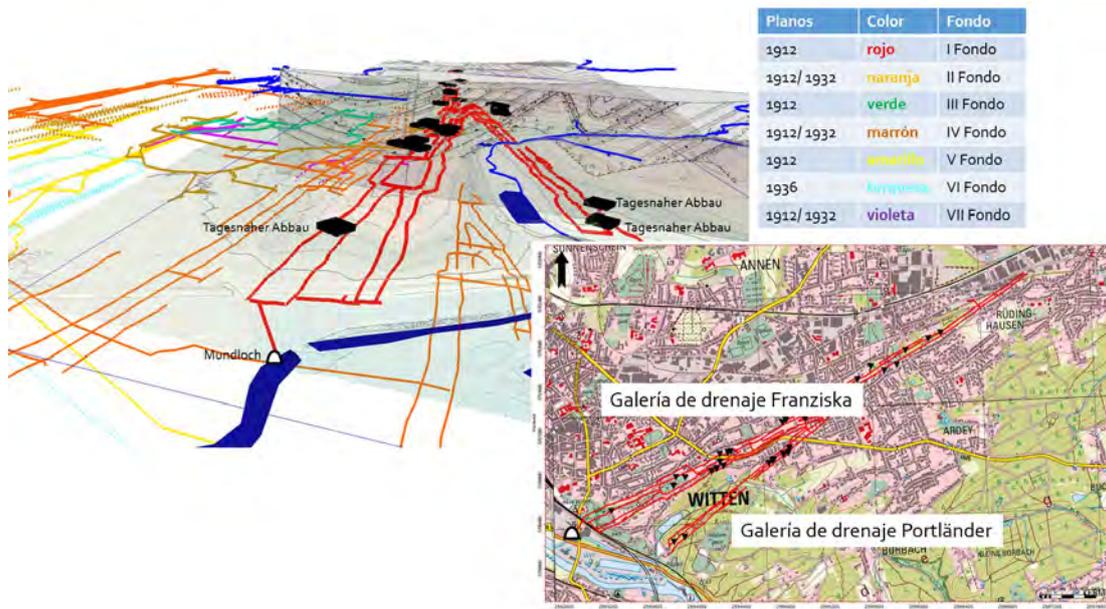


Figura 1: Localización de las galerías de drenaje *Franziska Erbstollen* y *Portländer Erbstollen*, así como de las demás galerías (líneas de diferentes colores) y de las instalaciones mineras cercanas a la superficie (cubos negros) que se encuentran bajo la superficie (transparente).

La combinación de datos espaciotemporales permite realizar una clasificación de los impactos mediante diferentes categorías (RUDOLPH et al. 2008). Esta clasificación de los impactos permite comprender de forma más integrada el comportamiento del drenaje y las interrelaciones hidrológicas e hidrogeológicas del sistema de galerías de drenaje. De esta manera, es posible hacer afirmaciones a largo plazo sobre la integridad del sistema.

En la evaluación tridimensional se ha aplicado el *software* de modelización de yacimientos Petrel de la empresa *Schlumberger*. El *software* permite construir modelos de estructuras geológicas basados en datos de sondeos y conjuntos de datos del subsuelo. Para el tratamiento de los sistemas de galerías de drenaje se evaluaron los planos disponibles en los años 1880, 1912 y 1932 para su localización y se convirtieron digitalmente. Mediante la superposición de un modelo de terreno de alta resolución se realizó una primera interpretación de las estructuras cercanas a la superficie.

En un paso posterior, se evaluó la información de los planos, concretamente la información estructural, y se cruzó con la información estructural de otros mapas. Esto permitió

construir un primer modelo estructural de las fallas en Petrel. Además, la superficie del Carbonífero y el llamativo límite inferior del Cretácico se modelan horizontales.

El modelo se enriqueció, además, con la información sobre las instalaciones cercanas a la superficie en lo que respecta a la hidrología, la hidrogeología y las instalaciones poco profundas. Para ello, se evaluaron los mapas topográficos de la cartografía original prusiana, cartografía nueva, así como ediciones modernas.

En el marco de la clasificación de impactos, se calcularon cinco categorías de < 25 m, < 50 m, < 100 m, < 250 m y > 250 m para las instalaciones registradas. En el segundo paso, las categorías se interseccionaron entre sí y, posteriormente, se subdividieron en cinco clases de impacto. La intersección sirvió para marcar zonas especialmente amenazadas. Aquí, se solapa la categoría más pequeña de la escala de los objetos considerados.

El último paso consiste en transferir dichas categorías tridimensionales y la clasificación de impactos a la representación bidimensional de un mapa. Para el tratamiento posterior, se llevó a cabo la geocodificación de las zonas clasificadas con el fin de inspeccionar las zonas identificadas y, en caso necesario, realizar labores adicionales.

El resultado es un modelo de estructura geológica con una extensión espacial (x, y, z) de unos 4 000 m x 5 500 m x 650 m y que comprende unos 120 millones de celdas con una resolución espacial muy alta (x, y, z) de 5 m x 5 m x 5m. Debido a esta alta resolución, fue posible calcular detalladamente las categorías tridimensionales de los elementos e interseccionarlos. El resultado son dos representaciones cartográficas (Figura 2 y Figura 3). Las categorías se calcularon para los siguientes elementos:

- Labores mineras,
- Explotaciones poco profundas,
- Aguas corrientes,
- Aguas estancadas,
- Fallas.

En este primer paso, aún no se han tenido en cuenta más aspectos como el uso del suelo o la geología cercana a la superficie. En este proyecto, la intersección con los datos de la medición final y la hidroquímica de la galería *Franziska Erbstollen* se realizó parcialmente.

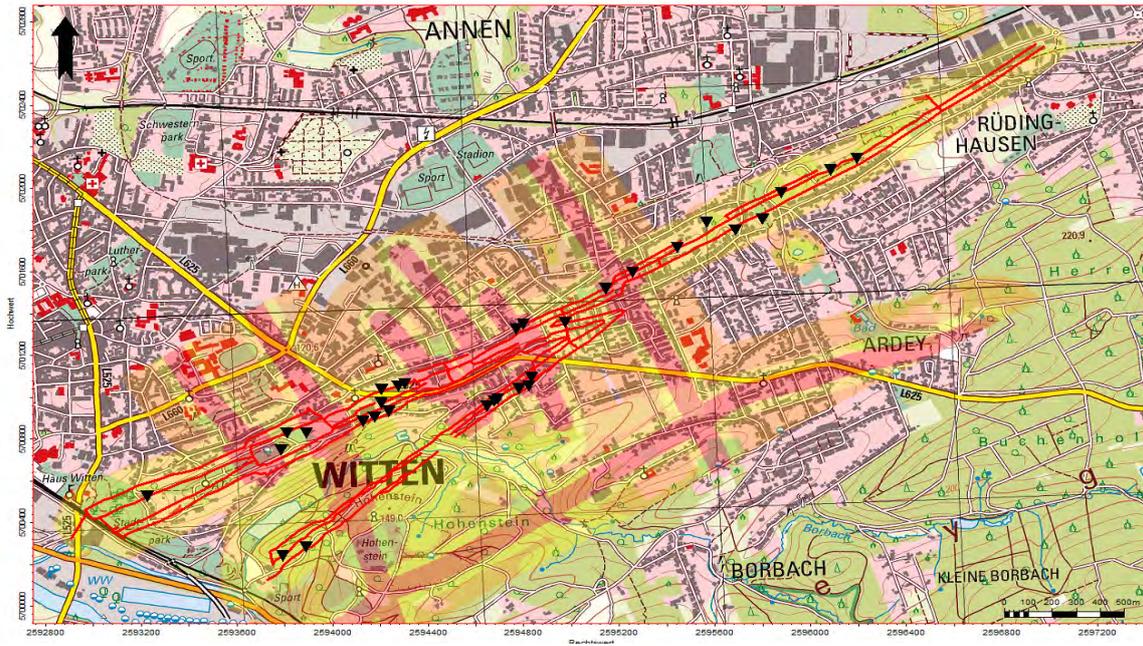


Figura 2: Representación de las cinco clases de separación simple. El rojo representa la clase de menor distancia y la de mayor impacto.

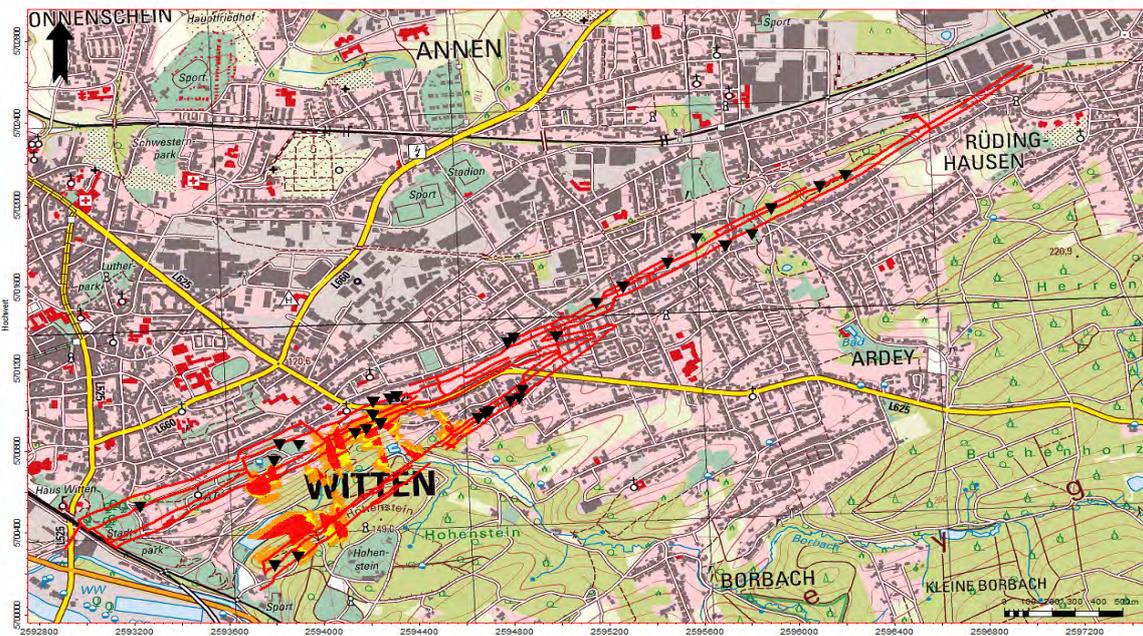


Figura 3: Representación de las cinco clases de influencia combinada. El rojo representa la clase de menor distancia y la de mayor impacto.

El cálculo tridimensional permite filtrar las distancias y las clases de separación para posibilitar otros análisis espaciales (Figura 4). La combinación de las clases de separación individuales de los cinco elementos analizados ofrece una primera impresión de las posibles áreas que pueden influir en el sistema de galerías de drenaje. La intersección con las clases de impacto muestra zonas especialmente amenazadas debido al solapamiento de los /elementos individuales examinados.

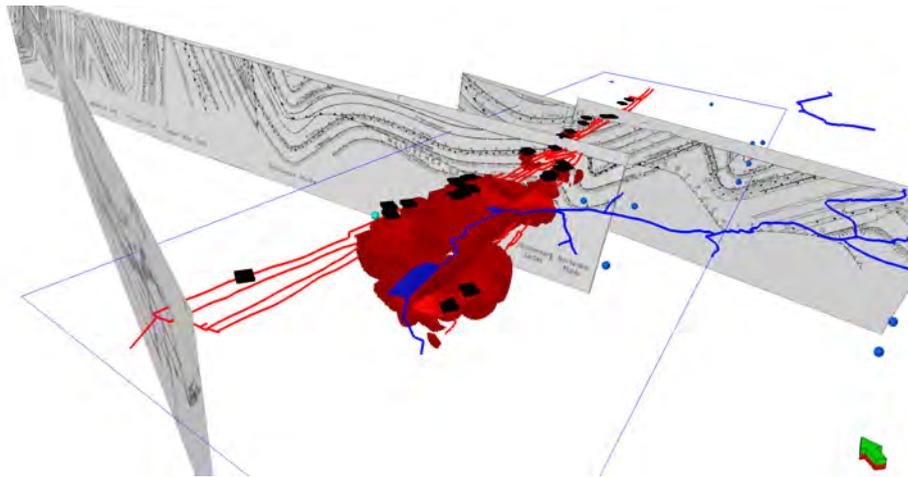


Figura 4: Representación en 3D de la clase de impacto más alta (= gran posibilidad de impacto externo en el sistema de galerías de drenaje).

Los resultados de la evaluación tridimensional de las distancias en las proximidades de las galerías *Franziska Erbstollen* y *Portländer Erbstollen* permiten por primera vez una valoración sencilla de la situación del subsuelo. Se puede observar que existen clases de impacto muy altas en la zona noroeste y central de la explotación cercana a la superficie y en el área del pequeño cauce de desagüe, lo que indica que aquí es posible el acceso directo y sin restricciones de las aguas superficiales al sistema subterráneo.

El análisis inicial de los datos de drenaje telemétricos y de precipitación muestra una correlación directa y casi inmediata entre el volumen de ambos. El sistema de la galería *Franziska Erbstollen* también muestra un volumen de descarga alto y constante, incluso en periodos sin precipitaciones, lo que indica una influencia externa. Este análisis de datos confirma los resultados del modelado tridimensional de la situación del subsuelo.

La integración de los conjuntos de datos subterráneos, de superficie, históricos y actuales conduce a un primer modelado. La combinación con los datos de drenaje sienta las bases para seguir trabajando en la hidrogeología del subsuelo. Los resultados son importantes para otros trabajos, así como para inspecciones, y proporcionan la base para un sistema de gestión de riesgos eficiente e integrado.

4 Vigilancia por interferometría radar de una galería de drenaje

La empresa EFTAS Technologietransfer GmbH, de Münster, y el Centro de Investigación de Posminería están investigando, junto con antiguas empresas de la industria alemana del carbón, la posibilidad de realizar una teledetección por satélite de las subsidencias mineras en la zona sur del Ruhr. Dado que el terreno de esta zona tiene todos los aspectos, incluyendo estructuras urbanas, superficies agrícolas y zonas forestales, la evaluación con radar interferométrico difícilmente puede hacerse partiendo de los elementos dispersores persistentes (PS). En su lugar, se utilizan métodos como el SBAS para detectar los movimientos del suelo. A modo de prueba, también se incluyó en las investigaciones el área de la bocamina de la galería *Edeltraut Erbstollen* en Sprockhövel.

En la primavera de 2016, se produjo un brote de agua en esta galería de drenaje (Figura 5). La causa podría ser una fractura en las explotaciones mineras de la galería, que impidió que el agua fluyera y, por tanto, provocó la formación de un terreno de agua estancada. Cuando se alcanzó un determinado nivel de presión, la barrera de drenaje falló y se produjo una descarga repentina del agua previamente acumulada en la bocamina de la galería. La formación de un terreno de agua estancada de este tipo podría provocar un levantamiento de la superficie. En consecuencia, se plantea la cuestión de si este movimiento del terreno es visible en los datos de radar analizados, y si su cantidad y curso temporal serían lo suficientemente significativos como para emitir una alerta temprana.

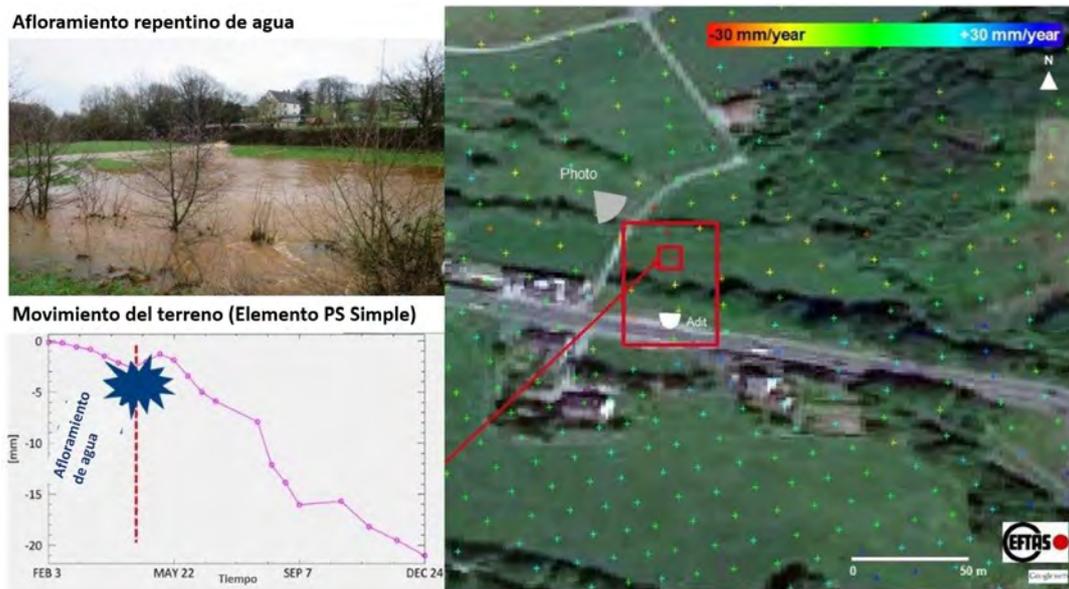


Figura 5: Brote de agua en la galería Edeltraut Erbstollen y evaluación interferométrica radar en el entorno (EFTAS, Google Earth).

En el caso concreto de la galería *Edeltraut Erbstollen*, las explotaciones mineras se encuentran al sur de la bocamina. En el transcurso de la evaluación interferométrica radar no se detectan movimientos durante el período. Sin embargo, este análisis descubrió movimientos por encima de la pradera al norte de la bocamina, aunque según el estado actual de la cuestión no se excavaron aquí labores mineras. Esto evidencia la necesidad de un análisis integrado y también una intersección de la evaluación de detección remota con conjuntos de datos *in situ* (por ejemplo, planos mineros).

Actualmente se está trabajando para perfeccionar la evaluación del SBAS con el fin de obtener mejor información sobre la relevancia del movimiento del suelo. Para ello, en los análisis se incluyen datos más precisos sobre la cubierta terrestre, la intensidad de las precipitaciones, la simulación del hinchamiento y la contracción del suelo inducidos por las precipitaciones y los consecuentes movimientos de la superficie. Los resultados de los trabajos en curso se comunicarán en su momento.

5 Otros métodos de vigilancia

Además de vigilar el terreno por encima de las instalaciones de una galería de drenaje y registrar los parámetros sobre el agua de mina, son importantes los puntos de medición para determinar el nivel freático de la mina. Del análisis de los datos topográficos y de la visualización en 3D se extraerán los puntos de sondeo iniciales adecuados para los puntos de medición de perforaciones, que permitirán básicamente el seguimiento de la formación de terrenos de agua estancada en las labores de la mina.

Como se ha explicado, con los colapsos de las bocaminas se forman terrenos de agua estancada, entre otras cosas. La vigilancia de fallas en el cuerpo de la roca a partir de la nano y micro sismología podría dar lugar a resultados relevantes. Además, los métodos de teledetección pueden ampliarse mediante el uso de datos multispectrales e hiperespectrales con el fin de detectar de manera temprana posibles cambios en la humedad del suelo, al igual que en la vegetación. Para las zonas especialmente sensibles, también existe la posibilidad de obtener más información sobrevolándolas con UAV de alta resolución.

6 Perspectivas

Los trabajos posteriores de vigilancia de galerías de drenaje servirán para perfeccionar los instrumentos descritos y seguir analizando los datos de forma integrada. El objetivo de la cooperación entre el Departamento 6 de Minería y Energía del Gobierno del Distrito de Arnsberg, de NRW y el Centro de Investigación de Posminería del THGA es establecer un sistema eficaz de gestión de riesgos para las galerías de drenaje en el sur de la Cuenca del Ruhr y otras zonas de Renania del Norte-Westfalia.

El análisis de riesgo multidimensional (espacio, tiempo) requiere una buena comprensión de los procesos e interrelaciones posmineros que tienen lugar en las galerías de drenaje de la mina. Además de influir en los cambios en el terreno, se producen cambios en la mecánica de rocas, hidrogeológicos e hidráulicos. Para interpretarlos, clasificarlos y, al menos, empezar a comprenderlos, es necesario tener una representación 4D de la mina. Por lo tanto, también deben utilizarse todas las fuentes de información que puedan contribuir a elevar este elemento central de la vigilancia al máximo nivel posible.

7 Conclusión

A lo largo de los últimos años, los trabajos del Centro de Investigación de Posminería (FZN) han permitido identificar más de 100 galerías de drenaje en el sur de la Cuenca del Ruhr. Más de la mitad de estas galerías son acuíferas. Estos sistemas de drenaje son muy longevos y difíciles de interpretar en cuanto a su modo de funcionamiento, especialmente porque suelen ser estructuras complejas e interconectadas.

Dado que las galerías de drenaje pueden plantear riesgos significativos para la seguridad del terreno, se requiere un sistema de gestión de riesgos que, en el mejor de los casos, incluya también elementos de alerta temprana.

Junto con el Departamento 6 de Minería y Energía de NRW del Gobierno del Distrito de Arnsberg, el FZN está trabajando en los instrumentos de seguimiento adecuados para mejorar la comprensión del sistema y del proceso de las galerías de drenaje y las labores mineras adjuntas. Los elementos esenciales son la visualización en 3D del terreno y de la explotación minera sobre la base de la información topográfica, la evaluación de los datos de los volúmenes de descarga, la definición del área de captación y la determinación de la infiltración de las precipitaciones en función del uso del suelo.

El artículo describe la representación tridimensional de la situación del subsuelo y su intersección con información adicional, como conjuntos de datos telemétricos, que se llevó a cabo por primera vez en el marco de la evaluación del sistema de las galerías de drenaje *Franziska Erbstollen* y *Portländer Erbstollen*. Como ejemplo de la evaluación interferométrica radar en la zona de la galería *Edeltraud Erbstollen*, se muestra una posible aplicabilidad de estos conjuntos de datos de teledetección.

Únicamente mediante la integración de los conjuntos de datos subterráneos y superficiales, históricos y actuales, es posible elaborar una clasificación de los impactos, comprender las posibles relaciones de causalidad y los retos posmineros de las galerías de drenaje de la zona sur del Ruhr y evaluarlos y supervisarlos en el marco de un sistema integrado de gestión de riesgos.

Referencias

- ARBEITSKREIS 4.6 „ALTBERGBAU“ DER FACHSEKTION INGENIEURGEOLOGIE IN DER DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V. (DGGT) UND DES DEUTSCHEN MARKSCHEIDERVEREINS E.V. (DMV) (2017): In: MEIER, G., BENNDORF, J., LÖBEL, K.-H., BUTSCHER, C., TONDERA, D. & BUSCH, W. (HRSG.): 17. Altbergbau-Kolloquium. 16. bis 18. November 2017, Freiberg. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, Anh., S. 1-19.
- HOGREBE, P., VIERHAUS, N., HUNKE, A. & LINDER, N. (2016): Wasserführende Stollen: Die Erkundung, Planung und Sicherung des Franziska Erbstollens in Witten, NRW. In: BUSCH, W., KNOSPE, S., MEIER, G., SROKA, A., LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H. & TONDERA, D.; Technische Universität Clausthal. Abteilung Markscheidewesen und Geoinformation (Hrsg.): 16. Altbergbau-Kolloquium im Hotel- und Tagungszentrum "Der Achtermann" in Goslar vom 10. bis 12. November 2016. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 119-131.
- MELCHERS, C., MICHEL, I., GOERKE-MALLET, P. & WELZ, A. (2015): Erste Bestandsaufnahme wasserführender Stollen an der Ruhr. In: MEIER, G., SROKA, A., LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H., TONDERA, D. & BUSCH, W. (Hrsg.): 15. Altbergbau-Kolloquium vom 5. bis 7. November 2015 in Leoben. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 158-168.

MELCHERS, C., MICHEL, I., HOPPE, U., ISAAC, M. & GOERKE-MALLET, P. (2016): Methoden zur Ermittlung eines Einzugsgebietes wasserführender Stollen am Beispiel des Franziska Erbstollens in Witten. In: Busch, W.; Knospe, S.; Meier, G.; Sroka, A.; LÖBEL, K.-H., KLAPPERICH, H. & TONDERA, D., Technische Universität Clausthal. Abteilung Markscheidewesen und Geoinformation (Hrsg.): 16. Altbergbau-Kolloquium im Hotel- und Tagungszentrum "Der Achtermann" in Goslar vom 10. bis 12. November 2016. Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 107-117.

RUDOLPH, T., MELCHERS, C. & COLDEWEY, W.G. (2008): Geologisches Risikomanagement für Versicherungen. - ZVersWiss: 97, S. 371-388, 8 Abb., 4 Tab.

Publicado por primera vez en: Mayer, G.; Benndorf, J.; Löbel, K.-H.; Butscher, C.; Tondera, D.; Busch, W. (Hrsg.): 19. Altbergbaukolloquium. 7. bis 9. November 2019, Montanuniversität Leoben, Nossen: Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, S. 105-114.

Digital-Twin - Un mayor desarrollo del geomonitoreo integrado

Tobias Rudolph

Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Resumen

Durante los procesos «posmineros» y la preparación de la cesión por parte de las autoridades mineras, es importante mostrar que se dispone de información y conocimientos completos sobre la mina, la sobrecarga y las capas superficiales de todo su entorno.

Se puede usar para ello el enfoque *digital-twin*: un concepto que surgió con la cuarta revolución industrial a través del que se puede desarrollar de forma totalmente digital un proceso industrial completo partiendo de una idea, pasando por la implementación y mantenimiento, y llegando hasta el geomonitoreo y desmantelamiento (en el caso de las minas).

Durante el ciclo de vida de una mina se genera una gran cantidad de datos y de información sobre esta, la sobrecarga y las capas superficiales. Así, se recogen cuestiones de los campos de la geología, la geología estructural, la exploración y el seguimiento geofísicos, la petrofísica, los registros de perforación, la geoquímica, la hidrología, la hidrogeología, la hidroquímica, la geomecánica y la teledetección. No obstante, estas bases de datos se usan principalmente para la exploración y la explotación de la reserva.

Estas bases de datos son importantes para los procesos de trabajo posminero, y especialmente para fines de geomonitoreo, por lo que deberían integrarse y analizarse. Aplicando el concepto de *digital-twin*, es posible combinar estas bases de datos con la información disponible y optimizarlas con el conocimiento de especialistas, agrupándolas en silos de datos e, incluso, añadiendo los datos de seguimiento obtenidos en tiempo real.

Los sistemas de información geológica (GI por sus siglas en inglés) tradicionales y 3D se pueden usar para hacer una representación digital de una zona minera. En aras de la gestión requerida de conocimiento, estos sistemas permiten un enfoque analítico integrado, así como evaluaciones científicas y visualizaciones. Mediante *Digital-Twin*, el Centro de Investigación Posminera (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN por sus siglas en alemán) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA por sus siglas en alemán) tiene por primera vez la oportunidad de diseñar y desarrollar un geomonitoreo integrado y sostenible de la fase tras el cierre de la mina.

¹ N. de T.: Se utilizan los términos «posminera», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

1 Introducción

Hoy las empresas industriales y mineras usan aplicaciones y tecnologías digitales para adaptarse mejor a los cambios externos y mejorar su rendimiento operativo. En este contexto, el foco está en la explotación de las materias primas. Ahora, como prerrequisito de la licencia para operar y la excelencia operativa, se pueden aplicar ya los enfoques modernos del *digital-twin*, un concepto de la cuarta revolución industrial (GE 2019) (Figura 1). No obstante, todavía no se está aplicando en todo el ciclo de vida de la mina (incluida la fase posminera), sino que debe desarrollarse más en el marco del geomonitoreo (Figura 1).

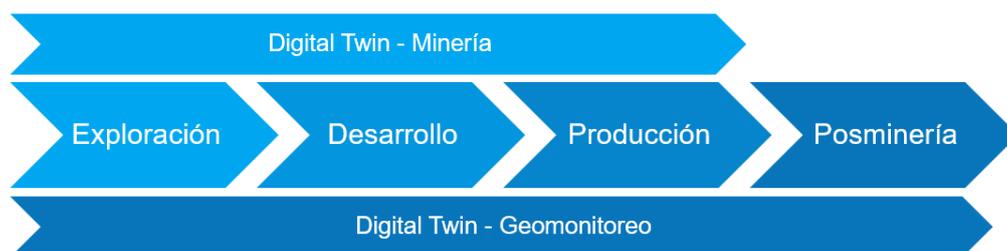


Figura 1: Digital-Twin en el ciclo de vida de la mina.

Un *digital-twin* es una representación virtual de un objeto físico o no físico del mundo real (GI 2019). Esta réplica digital permite integrar y estandarizar el intercambio de información siguiendo un modelo uniforme, así como llevar a cabo simulaciones completas antes o después de que se produzcan eventos. En la industria minera, el *digital-twin* sirve particularmente en la actualidad para mejorar y desarrollar más la explotación minera y los procesos asociados a esta. Por ejemplo, cuando se registran los resultados de la producción de la mina a diario, se hacen estimaciones y simulaciones en base a ellos, y, gracias a esta tecnología, estos se podrían utilizar de forma inmediata en la explotación en curso. Habiendo recogido digitalmente todo el proceso minero, será posible ajustarse y reaccionar rápidamente a las cambiantes condiciones sociales, políticas, económicas y de marco regulatorio. Es necesario desarrollar más esta representación virtual de la mina y dirigirse hacia una réplica digital del geomonitoreo para poder abordar estas cuestiones externas.

El geomonitoreo en la posminería representa un concepto integrado del control y seguimiento espaciales y de la evaluación de procesos importantes en antiguas minas. Para un programa de geomonitoreo es importante que se parta de un concepto a adaptar en la primera fase de aplicación en base al conocimiento recogido y que se siga desarrollando de forma continua. Esto será solo posible si los resultados del geomonitoreo se integran por completo. Así pues, un programa de geomonitoreo integrado incluye los siguientes pasos, tanto en sus orígenes como en su puesta en marcha (de acuerdo con Melchers 2019):

1. Definir los objetivos del geomonitoreo, integrándolos con objetivos a más alto nivel (por ejemplo, aprobaciones regulatorias, objetivos socialmente aceptados).
2. Seleccionar métodos y herramientas adecuados, y definir la relación entre los métodos y la selección de los métodos de referencia (aquí se aplicaría el concepto de *digital-twin*).
3. Establecer rutinas y periodos de observación, como su regularidad y duración (aquí se aplicaría el concepto de *digital-twin*).
4. Tener en cuenta los estándares, directrices y recomendaciones.
5. Definir los umbrales y valores críticos/limitantes.
6. Definir procesos de acción y reacción.

El desarrollo de un programa de geomonitoreo se lleva a cabo en varias fases de aplicación:

1. Fase de exploración: aplicando los métodos iniciales a corto y medio plazo.
2. Fase de desarrollo: evaluando los resultados de los métodos más tradicionales y adaptándolos o ampliándolos a medio plazo.
3. Fase de producción: aplicando e integrando de forma óptima los métodos a corto o largo plazo.
4. Fase final: reduciendo los métodos al mínimo requerido a largo plazo.

Al integrar los resultados, se desarrolla un ciclo innovador, que lleva así a un proceso de comprensión de los aspectos de la posminería (Figura 2).



Figura 2: Integración del ciclo de geomonitoreo.

De esta forma, pueden aplicarse los resultados técnicos de los programas de geomonitoreo en las cuatro fases para una gestión de riesgos integrada, pudiendo mitigarse así los retos posmineros:

1. escombreras;
2. depósitos de residuos;
3. emisiones de gas;
4. instalaciones de infraestructuras/superficie;
5. movimientos del terreno;
6. socavón, antiguos pozos;
7. reactivación de fallas;
8. afloramientos en la superficie;
9. agua de mina;
10. zonas de pólder.

2 Desarrollo a futuro del geomonitoreo

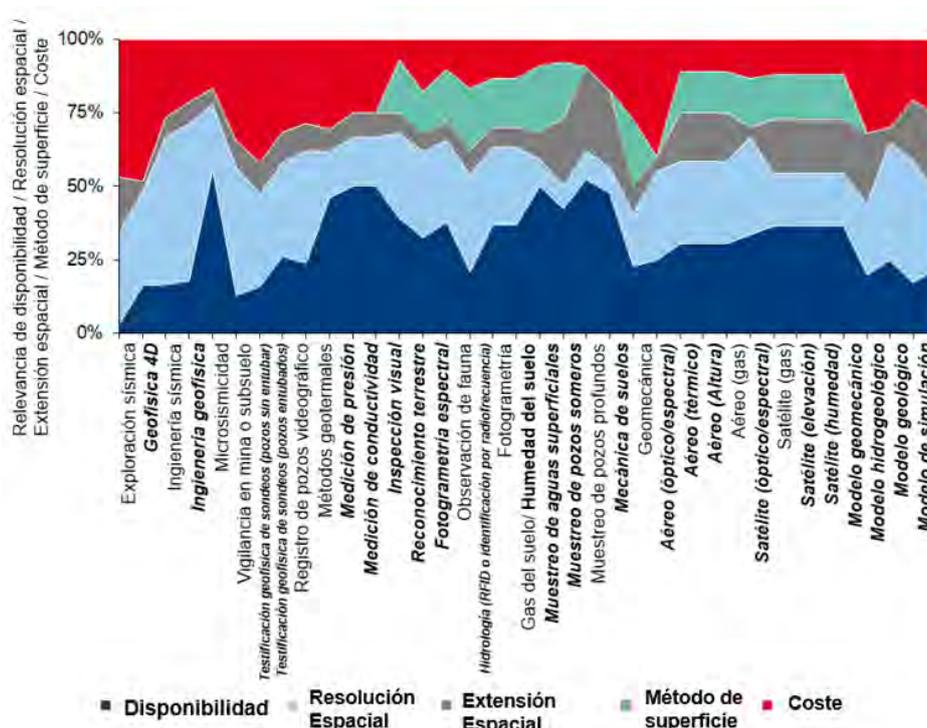


Figura 3: Resumen de los métodos de geomonitoreo disponibles.

Se pueden usar diversos métodos en el geomonitoreo (Figura 3). Puesto que no hay un método que proponga un enfoque holístico para el geomonitoreo de una mina, se deben aplicar diferentes métodos a la vez. Asimismo, estos deberán iterarse y agruparse en silos individuales de datos, y los resultados se deberán integrar digitalmente. Como base

para el geomonitoreo, deben establecerse *datasets* básicos y estáticos, que podrán ampliarse a partir de bases de datos históricas o de archivo (que podrían requerir una revisión desde una perspectiva contemporánea). En base a esto, se deberían incluir los datos de geomonitoreo con una mayor frecuencia de registro (semanal o mensual) u obtenidos a partir de bases de datos a tiempo real (24/7). Esto generaría un *digital-twin* posminero (Figura 3). Todos los métodos mencionados pueden aplicarse en toda la industria minera.

El ejemplo ficticio de la actividad minera subterránea para la obtención de materias primas muestra la posibilidad de seguir desarrollando el geomonitoreo hacia el *Digital-Twin* (Figura 4). El escenario ficticio de la figura empieza con una situación clásica: las primeras bases de datos están disponibles desde el desarrollo de la localización, habiéndose interpretado a nivel particular para describir la reserva minera. Solo se puede dar respuesta a las cuestiones posmineras hasta cierto límite; no es posible comprender las interacciones. De esta manera, la cuestión sobre la aparición de metano en el agua subterránea de una perforación solo se puede tratar en correlación con la actividad minera.

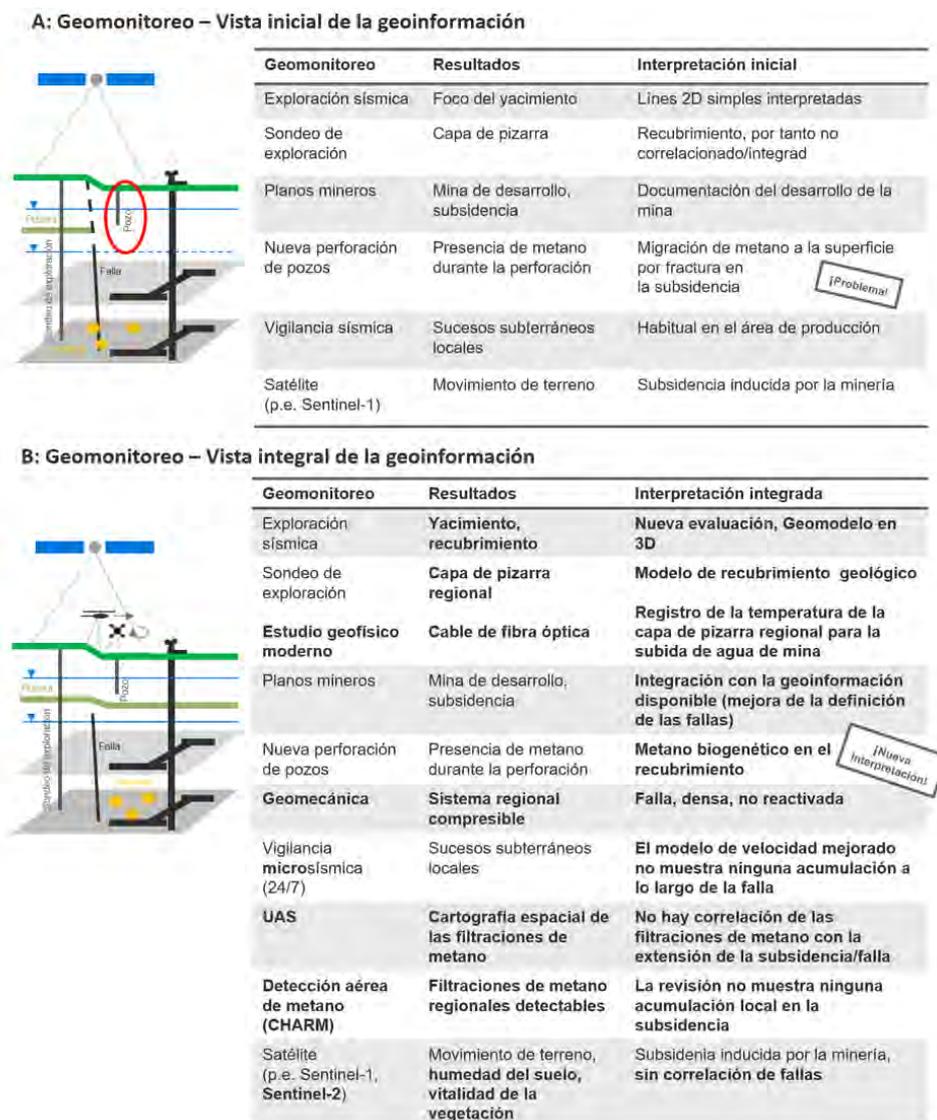


Figura 4: Geomonitoreo – *Visión inicial (A) y visión integrada (B).*

La reevaluación de las bases de datos (históricas) junto con una ampliación simultánea de los enfoques de geomonitoreo modernos, así como la integración directa de datos a tiempo real (como los obtenidos a través del seguimiento de microsismos) o datos de alta frecuencia obtenidos mediante teledetección están llevando a una mayor comprensión. Se relaciona a partir de esta la aparición del metano en agujeros de perforación con procesos biológicos en las capas superiores y no con la actividad minera. Todo ello influirá directamente en la planificación y, si se requiere, en la implementación de tareas (permanentes) en la posminería y los costes asociados a esta.

3 Conclusiones

El concepto de una posminería *Digital-Twin* basada en el uso de un geomonitoreo integrado es interdisciplinar e innovador. El número de herramientas de geomonitoreo completas disponibles permite unos análisis de antiguas zonas mineras completos y espaciotemporales (incluso a tiempo real). Como resultado, es posible identificar, evaluar y desarrollar recomendaciones optimizadas de actuación. Por primera vez, el Centro de Investigación Posminera (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN por sus siglas en alemán) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) de Bochum (Alemania) tiene una oportunidad única para hacer uso de métodos de geomonitoreo que integren la tecnología *digital-twin* en minas.

Referencias

- GE (2019): Transform your mine into a digital industrial Company. https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/GE-Digital-Mine-Transform-Your-Mine-Into-A-Digital-Industrial-Company.pdf (visitado por última vez el 11/03/2019).
- GI (2019): Digitaler Zwilling. – Gesellschaft für Informatik e.V. <https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling/> (visitado por última vez el 11/03/2019).
- Melchers, C. (2019): Monitoring in der Nachbergbauphase. – Vortrag bei der NACHBergbauzeit in NRW 2019.

Esta es la versión en español de una versión revisada de un artículo publicado antes en alemán: Rudolph, T. (2019): Digital-Twin – Integriertes Geomonitoring weiterentwickelt. In: Technische Hochschule Georg Agricola, Forschungszentrum Nachbergbau & Deutscher Markscheiderverein (eds.): Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2019. Übergang zu neuen Zeiten, 11. – 13. September 2019, Technische Hochschule Georg Agricola, Bochum, S. 15-22.

Geomonitoreo en antiguas minas y posminería

Tobias Rudolph, Peter Goerke-Mallet, Christian Melchers

Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Resumen

La minería del siglo XXI abarca del mismo modo tanto a la tradicional como a la «posminera»¹, esta última ligada a la gestión de los retos posmineros y a las tareas a largo plazo y futuras. Esto plantea dudas sobre los costes asociados y sobre la posibilidad de una evolución en el ámbito de la integridad y la supervisión de las explotaciones mineras. El Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) de Bochum se ha propuesto desarrollar planteamientos para encontrar respuestas.

Así pues, es fundamental tener un conocimiento exhaustivo e integrado del yacimiento y de los estratos suprayacentes de una mina para poder probar su integridad a largo plazo. Durante el ciclo de vida de una mina, se acumulan un gran número de datos técnicos, así como de información y conocimientos que tienen un papel decisivo dentro de la minería tradicional y la posminería, destacando su importancia para la supervisión del emplazamiento (geomonitoreo). Por ello, deben evaluarse de manera exhaustiva. Para este fin se aplica el concepto de *Digital-Twin*, perteneciente al área temática de la «Industria 4.0». En un *Digital-Twin* (gemelo digital), todo el proceso industrial, desde la idea hasta la implementación, el mantenimiento y la monitorización, así como el desmantelamiento, se crea y evalúa digitalmente. A partir de la geoinformación disponible se crea un gemelo digital, es decir, una imagen/modelo digital de una explotación minera activa o antigua.

Para el Centro de Investigación de Posminería de la Technische Hochschule Georg Agricola University de Bochum, la implementación del concepto *Digital-Twin* permite diseñar y seguir desarrollando procesos de minería tradicional y posminería, para así poder evaluar y dirigir los retos posmineros, las tareas a largo plazo y futuras, así como los costes y riesgos asociados.

1 Introducción

Actualmente, la geoinformación y las aplicaciones digitales sirven principalmente a las empresas mineras en su labor de controlar la gestión operativa de la extracción de materias primas. Esto permite reaccionar mejor, más rápido y de forma más rentable a los

¹ N. de T.: Se utilizan los términos «posminero», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

cambios externos para mejorar así esta gestión. La geoinformación generada incluye la exploración geofísica y la geología de los yacimientos, pero también la vigilancia, como, por ejemplo, de conjuntos de datos procedentes de la teledetección. Estos datos contienen adicionalmente planos topográficos y otros resultados de mediciones. Sin embargo, esta recopilación de datos está orientada principalmente a la exploración, explotación y producción del yacimiento real. En el marco de la responsabilidad del operador (license to operate, licencia para operar, en español) y de la optimización operativa (*Operational Excellence*), se están aplicando los modernos enfoques de *Digital-Twin*, un concepto dentro de la Industria 4.0 (GE 2019). Sin embargo, aún no se está aplicando el concepto de *Digital-Twin* en el ciclo minero completo, que incluye también los procesos antiguos y posteriores a la minería, y que se desarrolla en el marco del geomonitoreo (Figura 1).

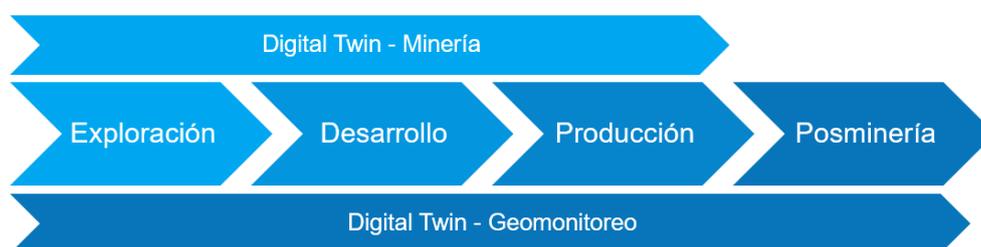


Figura 1: El concepto de *Digital-Twin* en el ciclo de vida de la minería.

Digital-Twin es una representación digital (gemelo digital) de un objeto físico (por ejemplo, una mina) o abstracto (por ejemplo, una idea inicial de proyecto) del mundo real (IG 2019). La representación digital permite un intercambio global y estandarizado de geoinformación en un formato común. Esto también permite realizar simulaciones y predicciones detalladas antes o después de un suceso. En la industria minera, un *Digital-Twin* ayuda a mejorar y desarrollar particularmente la extracción y los procesos que esta actividad conlleva, ya que se puede reaccionar de manera inmediata. Una base importante en este sentido la proporcionan los conjuntos de datos topográficos y de medición técnica. Así, por ejemplo, los resultados actuales de la extracción se pueden registrar con precisión y de forma digital a partir de la base de datos de extracciones anteriores, y los pasos posteriores se pueden simular. Esto implica la realización de predicciones de mayor alcance, que, de nuevo, se integran directamente en la extracción. Dado que todo el proceso minero está ya completamente digitalizado, es posible adaptarse rápidamente y reaccionar a los cambios sociales, políticos, económicos y de concesión de licencias. En el marco de la posminería, esta representación digital de la mina debe seguir desarrollándose hacia la representación digital del geomonitoreo. Es decir, que se deben gestionar los retos posmineros, comprender las interdependencias y controlar los costes. Solo de esta manera se podrá sacar el máximo partido a la geoinformación.

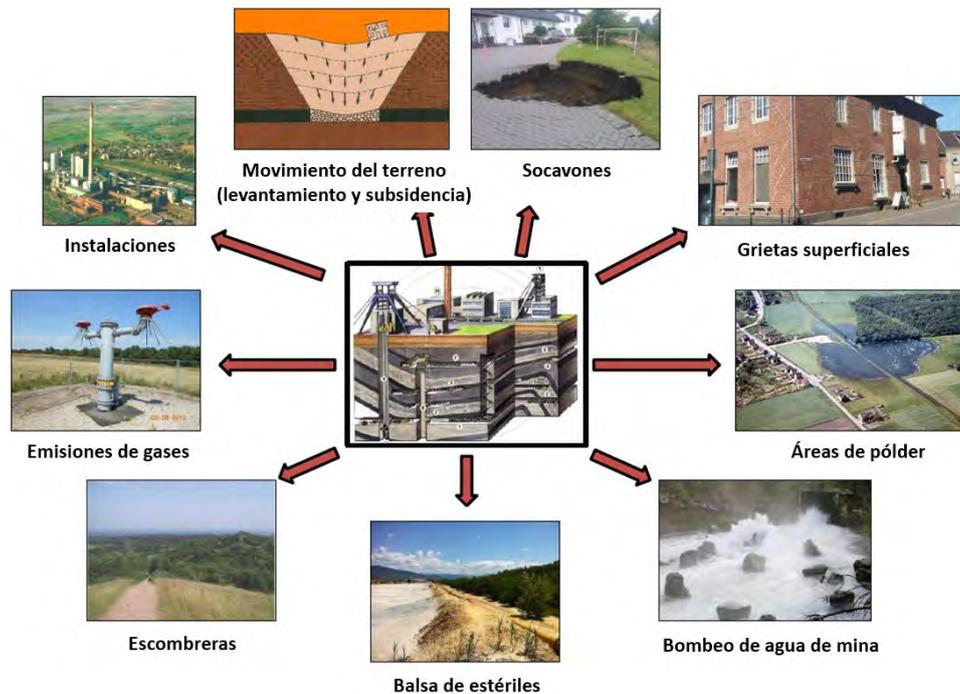


Figura 2: Retos posmineros (Sentido de las agujas del reloj desde abajo a la izquierda: 1.) THGA, 2.) THGA, 3.) Boese & Farrenkopf 2014, 4.) Kratzsch 2013, 5.) DMT, 6.) Baglikow 2012, 7.) EGLV, 8.) City of Bochum, 9.) EFTAS, 10.) GvSt).

Los retos posmineros son (Figura 2):

1. Subsidencia minera/ pozos antiguos
2. Falla geológica/ Reactivación de fallas
3. Terrenos pólder
4. Drenaje minero ácido
5. Escombreras y balsas de decantación
6. Emisiones de gas
7. Infraestructuras/instalaciones sobre el terreno
8. Movimientos del terreno

Mediante la aplicación de conceptos de geomonitoreo integrados en emplazamientos antiguos y posteriores a la minería, se pueden desarrollar programas de trabajo para la observación, el control y la monitorización espaciotemporales, así como la evaluación de los procesos relevantes para el sistema. Para realizar un programa de monitorización es importante que se desarrolle un concepto inicial, para luego adaptarlo en la primera fase de aplicación y desarrollarlo de manera continua partiendo de los conocimientos obtenidos de la geoinformación (Figura 3). Se trata de un ciclo, porque la experiencia y los conocimientos deben transmitirse de un proyecto a otro o de una explotación minera a otra.



Figura 3: Ciclo de integración de la geoinformación en el ámbito del geomonitoreo.

Por lo tanto, es aconsejable desarrollar programas de monitorización en varias fases con los correspondientes puntos de revisión. También debe tenerse en cuenta que esto solo es posible con una integración completa de los resultados de la observación.

Un concepto de geomonitoreo integrado y mejorado comprende, pues, los siguientes pasos, tanto en su concepción como en su implementación (según DMV 2014, según Melchers et al. 2019):

1. Definición del objetivo de la monitorización en la integración con los objetivos superiores (por ejemplo, la transparencia, las concesiones de licencias, el objetivo socialmente aceptado).
2. Selección de los métodos y herramientas adecuados; definición de la conectividad entre los métodos y determinación de los métodos principales (punto de partida para la implementación del concepto *Digital-Twin*).
3. Determinación de rutinas de seguimiento y plazos (regularidad y duración).
4. Atención a las normas, directrices y recomendaciones (de actuación).
5. Definición de valores límite, de alerta y de objetivo.
6. Definición de los procesos de acción y reacción para las opciones de actuación y las medidas de comunicación.

Con estos fundamentos se crea un programa de geomonitoreo y, así, se produce un *Digital-Twin* en cuatro fases de aplicación. El geomonitoreo debe ajustarse continuamente durante estas fases en función de la geoinformación obtenida. Las cuatro fases son:

1. Fase exploratoria, con la aplicación de los métodos inicialmente definidos a corto y medio plazo.
2. Fase de desarrollo, con evaluación de los resultados de los métodos iniciales y ajuste y/o ampliación de los métodos a medio plazo.
3. Fase de producción, con la aplicación e integración óptimas de los métodos a medio y largo plazo.
4. Fase final, con la reducción, si procede, de los métodos al mínimo necesario durante periodos de tiempo prolongados, así como la finalización del geomonitoreo.

Al integrar los resultados de cada una de las fases, se desarrolla un ciclo de innovación que, partiendo del mero seguimiento del lugar, conduce a una comprensión de las relaciones de causalidad de la posminería (Figura 3). De este modo, los resultados también pueden aplicarse en la evaluación de riesgos con el fin de poder trabajar y gestionar los desafíos posmineros.

2 Desarrollo del geomonitoreo

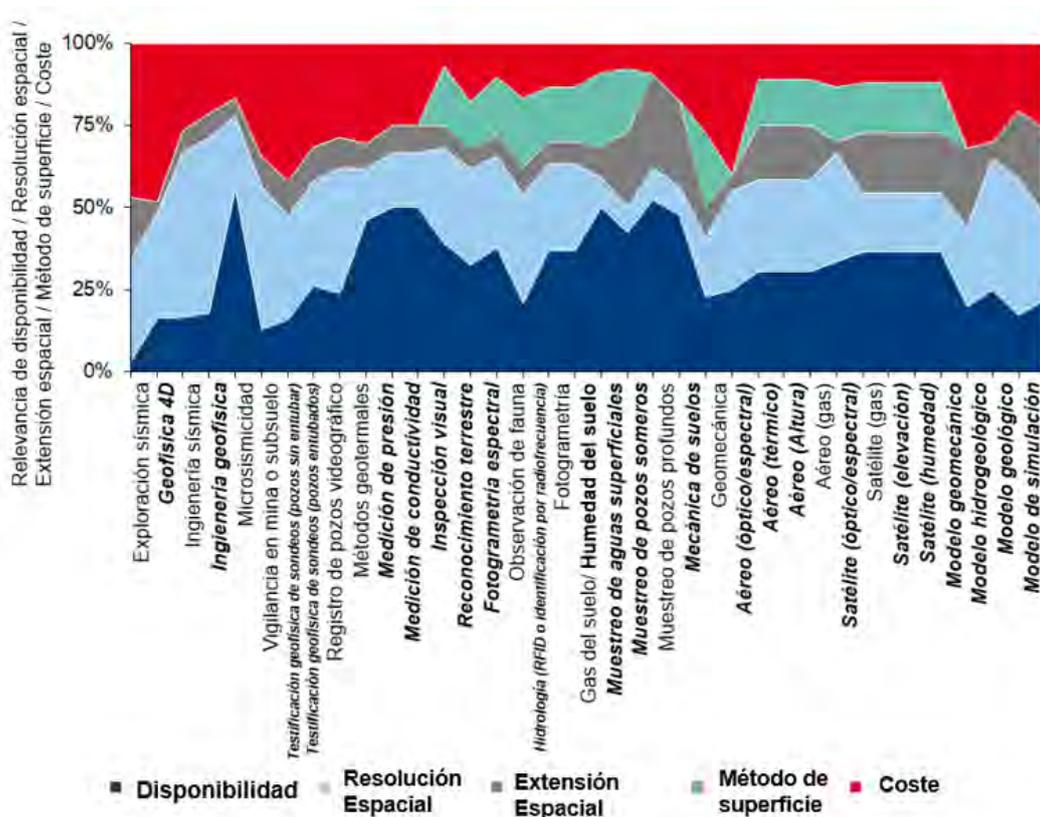


Figura 4: Representación gráfica de la comparación de la relevancia de los diferentes métodos de geomonitoreo.

En el geomonitoreo de la minería tradicional y la posminería se pueden aplicar diversos métodos para generar y procesar la geoinformación (Figura 4). Dado que ningún método por sí solo proporciona un resultado holístico en la monitorización de una mina, es

necesario llevar diferentes métodos simultáneos a la aplicación digital, iterarlos, agrupar datos y resultados individualmente para, finalmente, integrarlos. La geoinformación base estática sirve de punto de partida para el geomonitoreo, que también puede ampliarse con geoinformación histórica y/o de archivos. La primera debe ser revisada y evaluada desde una perspectiva actual. A partir de ahí, se integran datos de supervisión adicionales con una mayor frecuencia de registro (diaria/semanal/mensual) o con registros de datos en tiempo real (24/7), así como de datos *in situ*. Un ejemplo de ello son los sensores descentralizados y de bajo coste para supervisar elementos de minería tradicional, como el perímetro de los pozos (Berg et al. 2019) o sensores subterráneos para la subida del agua de mina (Witthaus und Melchers 2019).

En consecuencia, se obtiene una representación digital de las condiciones y procesos existentes, el llamado geomonitoreo con *Digital-Twin*. Los métodos que se presentan a continuación son aplicables a toda la industria minera (Figura 4). Esta presentación global de la comparación de la relevancia permite la selección simple y rápida de varios métodos para el geomonitoreo integrado.

Se puede observar que el uso de la sismología de exploración para el geomonitoreo proporciona una muy buena visión del subsuelo, si bien es uno de los métodos más costosos y, por lo tanto, rara vez se repite (disponibilidad). Por otra parte, la vigilancia microsísmica del subsuelo proporciona conjuntos de datos de alta resolución temporal (24/7) y espacial en emplazamientos (individuales) y, por consiguiente, una buena visión del subsuelo. Este método también es costoso, ya que requiere la colocación de un gran número de sensores en el sitio. Para la geodesia y la geoinformación, los métodos principales de observación terrestre por satélite proporcionan, en comparación directa con métodos anteriores, una disponibilidad temporal muy alta (frecuencia de vigilancia), así como una buena resolución y extensión espacial (Riecken et al. 2019). Aunque son métodos más baratos (según el sensor y el portador), solo llegan a la superficie, seguramente a pocos centímetros por encima del suelo (según la longitud de onda). Estos ejemplos muestran claramente que ningún método proporciona una respuesta única, sino que siempre deben combinarse varios métodos entre sí y, además, con conjuntos de datos *in situ*. El desarrollo se consigue, por tanto, con la combinación continua, digital y espaciotemporal de métodos variados con conjuntos de datos distintos a lo largo de todo el ciclo de la mina. Al mismo tiempo, es importante seguir desarrollando los planteamientos elegidos basándonos en los resultados obtenidos. Solo así se desarrollará el geomonitoreo con *Digital-Twin*.

3 Ejemplo de geomonitoreo con Digital-Twin

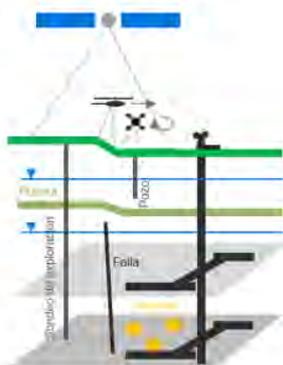
El ejemplo ficticio de la extracción subterránea de materia prima demuestra que es posible un mayor desarrollo del clásico geomonitoreo en dirección del *Digital-Twin* y de la integración de métodos (Figura 5). Sin embargo, también evidencia las dificultades en la interpretación inicial cuando solo se dispone de información geográfica limitada. Los procesos y conceptos de una mina de carbón subterránea presentados en este ejemplo son también transferibles a otros sectores de la minería.

A: Geomonitoreo – Vista inicial de la geoinformación



Geomonitoreo	Resultados	Interpretación inicial
Exploración sísmica	Foco del yacimiento	Lines 2D simples interpretadas
Sondeo de exploración	Capa de pizarra	Recubrimiento, por tanto no correlacionado/integrad
Planos mineros	Mina de desarrollo, subsidencia	Documentación del desarrollo de la mina
Nueva perforación de pozos	Presencia de metano durante la perforación	Migración de metano a la superficie por fractura en la subsidencia ¡Problem!
Vigilancia sísmica	Sucesos subterráneos locales	Habitual en el área de producción
Satélite (p.e. Sentinel-1)	Movimiento de terreno	Subsidencia inducida por la minería

B: Geomonitoreo – Vista integral de la geoinformación



Geomonitoreo	Resultados	Interpretación integrada
Exploración sísmica	Yacimiento, recubrimiento	Nueva evaluación, Geomodelo en 3D
Sondeo de exploración	Capa de pizarra regional	Modelo de recubrimiento geológico
Estudio geofísico moderno	Cable de fibra óptica	Registro de la temperatura de la capa de pizarra regional para la subida de agua de mina
Planos mineros	Mina de desarrollo, subsidencia	Integración con la geoinformación disponible (mejora de la definición de las fallas)
Nueva perforación de pozos	Presencia de metano durante la perforación	Metano biogénico en el recubrimiento ¡Nueva Interpretación!
Geomecánica	Sistema regional compresible	Falla, densa, no reactivada
Vigilancia microsísmica (24/7)	Sucesos subterráneos locales	El modelo de velocidad mejorado no muestra ninguna acumulación a lo largo de la falla
UAS	Cartografía espacial de las filtraciones de metano	No hay correlación de las filtraciones de metano con la extensión de la subsidencia/falla
Detección aérea de metano (CHARM)	Filtraciones de metano regionales detectables	La revisión no muestra ninguna acumulación local en la subsidencia
Satélite (p.e. Sentinel-1, Sentinel-2)	Movimiento de terreno, humedad del suelo, vitalidad de la vegetación	Subsidencia inducida por la minería, sin correlación de fallas

Figura 5: Ejemplo de un análisis de geomonitoreo con la vista inicial (A) y la integrada (B).

El punto de partida es el siguiente: se dispone de conjuntos de datos iniciales de la explotación del lugar, que se han interpretado para describir el yacimiento. Por lo tanto, las cuestiones acerca de la posminería solo pueden responderse de forma limitada, al igual que solo se pueden comprender parcialmente las relaciones causales de los retos posmineros. En este ejemplo, se perfora un pozo durante la fase final de la producción de la mina y se detecta metano en las aguas subterráneas (Figura 5A). Debido a los datos disponibles en ese momento, la presencia de metano en las aguas subterráneas solo puede correlacionarse con la actividad minera.

El establecimiento temprano de un geomonitoreo con *Digital-Twin*, ya en el inicio de la explotación del emplazamiento minero del ejemplo, así como la consideración de los conceptos de geomonitoreo (capítulo 1) habrían llevado a una interpretación inicial diferente. La reevaluación posterior de la geoinformación histórica y de la nueva permite una interpretación más desarrollada (Figura 5B, negrita). El geomonitoreo con *Digital-Twin* se ha ampliado para incluir los hallazgos de la vigilancia microsísmica, así como la geoinformación de alta frecuencia proveniente de la teledetección, como las imágenes satelitales (humedad del suelo, vitalidad de la vegetación, entre otros) y vuelos con helicópteros y UAS (*Unmanned Aircraft System*, también conocido como «dron»).

La reinterpretación muestra que la presencia de metano en el pozo se debe a procesos en las capas superficiales y, por tanto, no tiene una correlación directa con la actividad minera. Esta información influye, pues, directamente en la planificación y, en su caso, en la ejecución de (futuras) tareas de posmineras y en los costes asociados.

4 Conclusión y perspectivas

El concepto de geomonitoreo con *Digital-Twin* mediante el aumento de los métodos de geomonitoreo integrados es interdisciplinario e innovador. El gran número de métodos de geomonitoreo disponibles permite realizar análisis integrados y espaciotemporales, hasta en tiempo real, de explotaciones antiguas y posteriores a la minería.

La experiencia diversa acumulada del Centro de Investigación de Posminería de la Technische Hochschule Georg Agricola University de Bochum ofrece la posibilidad única de que las diferentes minas perfeccionen la geoinformación más diversa mediante el concepto de la geomonitoreo con *Digital-Twin*. Así, se pueden utilizar los conocimientos disponibles desde las zonas de extracción hasta el recubrimiento y las capas suprayacentes. Esto también puede aplicarse a otros sectores de la minería. De este modo, es posible identificar y evaluar las relaciones de causalidad posmineras y llevar a cabo recomendaciones de actuación optimizadas para, así, controlar los costes.

Referencias

- Berg, B.v., Schmachtenberger, F., Gruchalla, B.v., Wollnik, F., Klaub, S., Koschare, A., Schnell, S., Schliebs, J. (2019): Mineberry – remote monitoring of abandoned shaft openings. In: Proceedings of the 39th International Symposium »Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2019)«, June 4-6, 2019, Wroclaw, Poland. 578-585.
- DMV (2014): Empfehlungen zum Monitoring im Altbergbau. www.dmv-ev.de/literatur/regelwerke.html (visitado por última vez el 02/2020).
- GE (2019): Transform your mine into a digital industrial Company. www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/GE-Digital-Mine-Transform-Your-Mine-Into-A-Digital-Industrial-Company.pdf (visitado por última vez el 02/2020).
- GI (2019): Digitaler Zwilling. Gesellschaft für Informatik e. V. <https://gi.de/informatiklexikon/digitaler-zwilling> (visitado por última vez el 02/2020).
- Goerke-Mallet, P., Melchers, C., Mütterthies, A. (2017): Innovative Monitoring-Maßnahmen im (Nach-)Bergbau. In: Mining Report 153:3, 261-271.
- Melchers, C., Westermann, S., Reker, B. (2019): Evaluierung von Grubenwasseranstiegsprozessen – Projektbericht. In: Berichte zum Nachbergbau, Heft 1.
- Riecken, J., Krickel, B., Gefeller, V., Reifenrath, P. (2019): Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 6/2019, 144. Jg., 354-361. DOI: 10.12902/zfv-0281-2019.
- Witthaus, H., Melchers, C. (2019): Mine water monitoring in abandoned mines at RAG Aktiengesellschaft. In: Wolkersdorfer, C., Khayrulina, E., Polyakova, S., Bogush, A. (Hrsg.): Mine water: Technological and Ecological Challenges. Proceedings of the IMWA 2019 Conference, 15-19 July 2019, Perm, Russia. Perm: Perm State University, 59-67.

Publicado por primera vez en: Zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 145 (2020) Nr.3, S. 168-173.

Planteamiento para la detección de fugas de gas mediante el uso de cámaras de imagen termográfica en UAV

Bodo Bernsdorf¹, Anna Formaniuk², Tobias Rudolph¹

¹Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania; ²EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster, Alemania

1 Introducción

Desde mediados de los años noventa, se ha ido extendiendo cada vez más el uso de cámaras termográficas por los servicios de bomberos. Principalmente sirven de apoyo a los equipos en incendios de interior. Búsqueda de personas, en focos de incendio, rescoldos, para el nivel de llenado... Tiene múltiples aplicaciones, por lo que actualmente se pretende equipar a cada grupo de incendios de interior con una cámara termográfica. En cuanto al precio, no hay apenas argumentos en contra de su compra si se tienen en cuenta ciertos aspectos (Rüffer, M. 2019). En cualquier caso, el manejo de la cámara termográfica ha llegado a las formaciones y los equipos de emergencia conocen su funcionamiento.

Se hace evidente querer usar de manera segura esta nueva plataforma de transporte. Los *unmanned Aerial Vehicles (UAV)*, (en español, Vehículos Aéreos No Tripulados o VANT), comúnmente conocidos como «drones» y que en el ámbito de los servicios de bomberos suelen estar diseñados como sistemas de ala rotatoria con cuatro a ocho rotores, ofrecen una base adecuada para el uso de dichas cámaras termográficas. Wienecke, F. (2013) habla incluso de aplicaciones remotas de la cámara termográfica, aunque sigue situándolas en autoescalas o helicópteros. Wienecke siguió considerando que el escenario de aplicación principal son las operaciones de búsqueda en exteriores, por ejemplo, de personas o animales, cuando la visibilidad se ve obstaculizada por la niebla o la oscuridad (Wienecke, F. 2013: 13).

El desarrollo de las cámaras termográficas ha progresado en dos aspectos: por un lado, la miniaturización de los chips ha avanzado de tal manera que hoy en día ya se dispone de resoluciones geométricas considerablemente más altas de las concebibles en 2013. Además, la reducción del chip también sentó las bases para que el dispositivo en general tuviera un diseño ligero y pequeño, de modo que el funcionamiento del dron fuera concebible. Por ejemplo, una empresa checa ofrece de manera temporal una cámara de imagen térmica para drones con una resolución geométrica de 800 x 600 píxeles y un peso de 780 g. Las cámaras utilizadas para este artículo pesan solamente 100 g, con una resolución de 640 x 510 píxeles.

En el marco de los proyectos de investigación, se ha explorado cómo se puede evaluar mejor la propagación de gas con ayuda del UAV (Bernsdorf et. al. 2017/2, BigGIS 2018, Glock et al. 2018, Formaniuk, A. 2019). También se investigó la posibilidad de utilizar cámaras termográficas montadas en drones inicialmente para hacer detectables las fugas de gas invisibles. El presente trabajo resume los resultados obtenidos en varias investigaciones.

2 Situación inicial

Desde 2004, EFTAS ha participado en varios proyectos de investigación y desarrollo de productos con el uso de los multicópteros en el control de incendios y catástrofes. El punto de partida fue la idea de poner el *Copernicus Emergency Management System* (Servicio de Gestión de Emergencias por satélite Copérnico) (CEMS; Bernsdorf et.al. 2017/1 y 2017/2, DLR 2020) a disposición de las operaciones de extinción de incendios menos prolongadas. Los multicópteros, que se están extendiendo rápidamente, proporcionan una base excepcional para incorporar los sensores de los satélites a las operaciones de extinción de incendios. Se han realizado y mejorado ensayos con cámaras hiperespectrales, cámaras fotográficas normales para el rango de luz visible y cámaras termográficas.

Las cámaras termográficas proporcionan una buena base para evaluar un lugar de operaciones también por la noche y complementan de forma óptima a las cámaras de luz diurna. Sin embargo, mientras que las cámaras de luz diurna captan tres rangos del espectro de luz visible (R = rojo, G = verde y B = azul), las cámaras termográficas captan un rango de espectro que el ser humano no puede ver, pero sí sentir: la radiación térmica. La radiación térmica se encuentra en el rango del infrarrojo medio entre 3 000 nm y 50 000 nm y, por tanto, mucho más allá de la luz visible para nosotros (380 nm a 780 nm) en el rango de longitud de onda larga del espectro¹. El punto de partida consiste en que toda materia o cuerpo emite radiación térmica. Una cámara termográfica comercializada las capta a través de una óptica recubierta de aleaciones de germanio o de sales de zinc y concentra la radiación, generalmente en longitudes de onda entre 7 000 y 14 000 nm, en una matriz denominada *Focal Plane Array* (plano focal), que es un microbolómetro que responde a la radiación térmica en pocos milisegundos y envía un impulso eléctrico al exterior. Mientras tanto, estos microbolómetros de las cámaras termográficas de FLIR y OPTRIS solo tienen un tamaño de unos 17 000 nm x 17 000 nm y siguen siendo capaces de registrar radiación térmica a distancias de hasta 12 km (FLIR 2020, OPTRIS 2020).

En el marco del proyecto, se planteó el interrogante de si las fugas de gas invisibles para el ser humano podían ser detectadas con la ayuda de cámaras termográficas montadas en drones, y de qué manera sería posible. El foco de atención se puso rápidamente en el metano (CH₄) por diversas razones. El metano es un gas combustible, inodoro e incoloro. El metano de las tuberías de transporte no es, por tanto, perceptible para el

¹ Poster «*Electromagnetic Radiation Spectrum*», Online:

http://unihedron.com/projects/spectrum/downloads/spectrum_20090210.pdf

ser humano (al metano de la tubería de suministro al usuario final se le añade, por tanto, un agente odorizante). Tiene una elevada capacidad de absorción de la radiación de onda larga y la devuelve en forma de radiación térmica. En la atmósfera, este fenómeno se denomina «contrarradiación atmosférica», lo que convierte al metano en un gas perjudicial para el medio ambiente. Del mismo modo, el metano es, con diferencia, el gas natural más utilizado para la generación de calor y como materia prima para diversos procesos químicos y está disponible en casi todas las ciudades a través de la infraestructura de suministro. (Fabian, P. 1996). El metano es, pues, de gran relevancia para el servicio de bomberos.

Así pues, es, por ejemplo, más frecuente que se produzcan daños en las tuberías de gas natural debido a obras de construcción. Si el gas natural que se escapa se enciende sin una explosión y forma una llama abierta, el potencial de riesgo depende de la presión existente en la tubería y del tamaño de la fuga. Si el gas natural no se prende espontáneamente y el metano se mezcla con el oxígeno ambiental, existe riesgo de explosión (LII 4,4% - LSI 17%). La exploración desde una distancia fuera de peligro es, por tanto, de relevancia práctica.

3 Planteamiento metodológico

3.1 Trabajos preliminares

EFTAS pretende desarrollar en los proyectos de investigación aproximaciones con los que los sensores infrarrojos térmicos a bordo de vehículos aéreos no tripulados (VANT) puedan experimentar una georreferenciación de alta precisión a nivel de subpíxel mediante la automatización del procesamiento de imágenes. El objetivo era mejorar la tecnología de los sensores de los drones de manera que fuera posible un control automatizado en rangos de frecuencia que no son posibles en la actualidad. La última tecnología en las empresas de suministro de gas natural es la «percepción» de fugas de gas mediante sensores de detección de gas manuales o guiados por vehículos, o (si la presión es correspondientemente alta) se localizan mediante el oído. Además, para la vigilancia rutinaria se utilizan sensores láser en helicópteros o cámaras láser manuales. Estos métodos tienen el inconveniente, sobre todo en las grandes instalaciones de gas, como los depósitos de gas natural o las estaciones de compresión de gas natural, de que generalmente hay que determinar primero un punto de partida. Esto se suele llevar a cabo hoy en día a través de los sensores de la tecnología de automatización o de detectores de gas. Un procedimiento de seguimiento debería conducir en última instancia a la determinación temprana y automatizada de una geo-coordenada para detectar un daño y llevarse a cabo solo en zonas abiertas de las plantas técnicas de gas (infraestructuras críticas) y que sean supervisadas de manera limitada con sensores de detección de gas. Una detección más rápida de una fuga de gas no solo reduce los peligros previstos, como la explosión o la pérdida de combustible, que conlleva pérdidas económicas. El metano es también un gas perjudicial para el medio ambiente, por lo que las pérdidas de gas tienen un importante componente medioambiental. Después del rescate de per-

sonas y animales, el plano medioambiental ha adquirido gran prioridad en la matriz de peligros del servicio de bomberos.

A partir de los resultados iniciales de la investigación del proyecto de *Big Data* financiado por el BMBF *BigGIS Prädiktive und präskriptive Geoinformationssysteme basierend auf hochdimensionalen geo-temporalen Datenstrukturen* (sistemas de geoinformación predictivos y prescriptivos basados en estructuras de datos geotemporales de alta dimensión) (BigGIS 2018), EFTAS tuvo la capacidad de enviar imágenes infrarrojas térmicas a una estación terrestre a través de un enlace de radio mediante el proyecto de *Micro Rapid Mapping* (MRM) financiado por BMWi. A continuación, estas se pueden procesar y analizar ad hoc mediante una infraestructura informática más potente, como un ordenador rápido en un puesto de mando. Las cámaras termográficas utilizadas son, por ejemplo, FLIR Vue Pro R o la cámara Optris PI Lightweight. Estas son capaces de almacenar los valores radiométricos, lo que hace a las imágenes evaluables. En la propuesta de proyecto para el proyecto posterior *Infrared for Micro Rapid Mapping* (IR4MRM), se seguía afirmando que los drones del mercado de masas de DJI² y Yuneec³ solo proporcionan «imágenes a color». Esto sigue siendo así, pero en el proyecto surgió la pregunta de si también se puede conseguir un buen resultado con esas imágenes. Esto se debe a que los valores radiométricos pueden utilizarse para evaluar los rangos de temperatura posteriormente. Por ejemplo, con el *LAGErkunder* fue posible detectar una fuga invisible de gas metano en una planta de entrenamiento en la zona de maniobras del Cuerpo de Bomberos de Dortmund. En su momento se desarrollaron métodos de procesamiento de imágenes para este fin, lo que finalmente tuvo éxito, pero supuso sobre todo intervenciones manuales. Un informático tuvo que procesar las imágenes siguiendo los mis-mos pasos que un procesador de imágenes. Solo entonces se pudo detectar la fuga de metano.

En el proyecto IR4MRM, en cambio, había que desarrollar procedimientos automatizados que permitieran a un dron operar de forma autónoma y realizar la detección de gases nocivos a partir de las señales térmicas. El principal reto en el control superficial es el hecho de que una cámara termográfica se mueve en el UAV. Por lo tanto, no basta con la clásica georreferenciación. Hay que considerar un cotejo de coincidencias a nivel de subpíxel, que permita crear posteriormente diferencias entre los valores de los píxeles. Solo entonces es posible ver si hay cambios en la imagen o no. Dependiendo del escenario, ambos resultados son posibles y sirven de aliciente para alertar a los servicios de emergencia o a los técnicos de mantenimiento.

² El término DJI es de una marca protegida y se atribuye a la empresa SZ DJI Technology Co., Ltd.: <https://www.dji.com/de/policy?site=brandsite&from=footer#7>

³ El término Yuneec es de una marca protegida y se atribuye a la empresa Yuneec Europe GmbH: https://www.yuneec.com/de_DE/impressum.html

3.2 Método elegido para la detección de gas

La gráfica de la figura 1 muestra el planteamiento científico. En el proyecto *BigGIS*, se utilizó una cámara Optris PI para sobrevolar y grabar un gasoducto de baja presión (≤ 350 mbar) con una fuga de metano. Las primeras imágenes de cada una de las dos primeras filas muestran que la salida de gas de esta tubería de baja presión no puede ser percibida por el ojo humano. En la primera fila de la imagen se muestra que el procesamiento clásico de imágenes / fotogrametría no puede resolver el problema. Aquí, la georreferenciación habitual de las imágenes se llevó a cabo con el software de código abierto *MicMac*. La última imagen de la primera fila muestra el resultado de la compensación de las imágenes entre sí utilizando un método de sustracción para extraer las diferencias de temperatura por píxel. Es posible que solo se detecten interferencias debido a que el dron se mueve (ligeramente) y, por tanto, las imágenes no se tomaron exactamente en el mismo lugar.

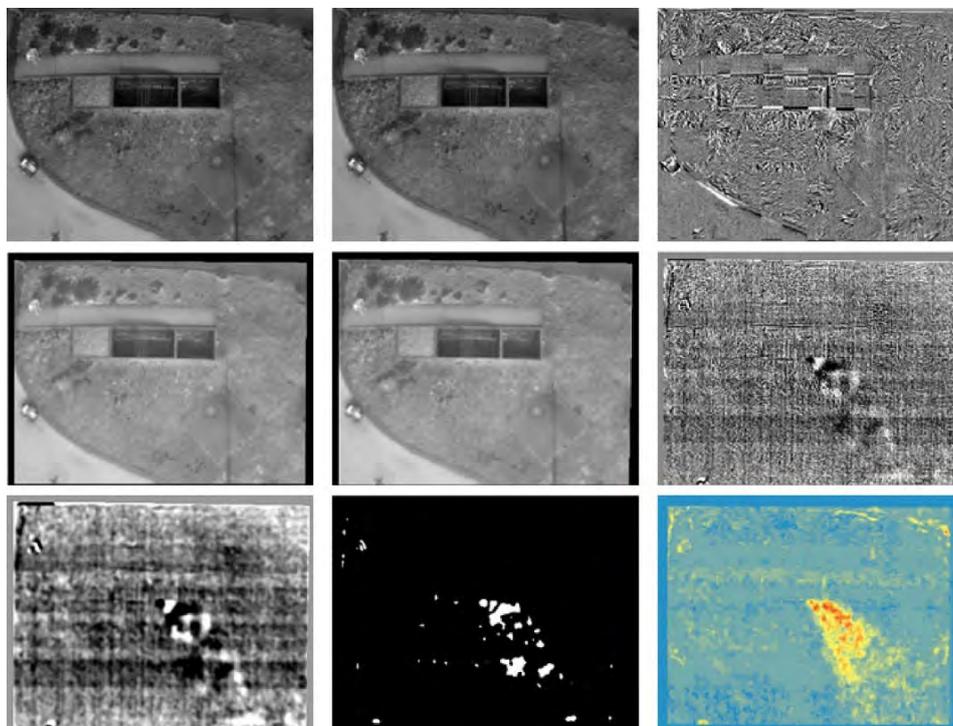


Figura 1: Procedimiento para la detección de gases.

El planteamiento científico de la detección de gases se basa en la automatización de un cotejo de coincidencia de subpíxeles, que se representa en la segunda fila mediante un procesamiento manual. Las imágenes se encajan unas sobre otras de forma que se desplazan unos píxeles sobre otros, identificados como puntos de coincidencia por el software industrial HALCON que aún se utiliza aquí. Si luego se aplica el método de sustracción, se puede percibir el patrón (imagen de la derecha en la fila central).

La última fila muestra el resultado de procesar 25 de estas imágenes. El control puede funcionar, el resultado de la detección de gas se visualizó coloreado en la imagen derecha de la fila inferior.

4 Recopilación de datos

De estos proyectos surgieron conjuntos de datos válidos:

- *BigGIS Prädiktive und präskriptive Geoinformationssysteme basierend auf hochdimensionalen geo-temporalen Datenstrukturen* (sistemas de geoinformación predictivos y prescriptivos basados en estructuras de datos geotemporales de alta dimensión) financiado por el BMBF; plazo: 01/04/2015 - 31/03/2018; vista aérea de la estación de bomberos de Dortmund, instalación para el entrenamiento con gas, Centro de Formación Dortmund-Eving, 05/03/2016.
- *Micro Rapid Mapping (MRM)* - Desarrollo de un sistema apoyado por dispositivos aéreos para la cartografía rápida de emergencia en accidentes con daños pequeños y medianos utilizando el ejemplo de accidentes de mercancías peligrosas y los incidentes en la industria química, financiado por BMWi; Duración: 01/09/2016 -31/12/2018; Diversos reconocimientos aéreos para la recogida de datos básicos para la georreferenciación.
- Continuación interna de EFTAS del MRM a través de su proyecto interno para derivar el producto LAGEerkunder; Duración: 01/01/2019 - 31/12/2019; Diversas vistas aéreas, por ejemplo, pruebas con bombonas de gas propano.
- Contrato para una prueba en un depósito de almacenamiento de gas natural; vista aérea de la instalación técnica de gas en Alemania el 13/09/2019.
- *IR4MRM - Infrared Sensors for Micro Rapid Mapping*; financiado por el BMVI; duración 10/-12/2019; reconocimiento aéreo en la estación de bomberos de Dortmund, instalación de entrenamiento con gas Centro de Formación de Dortmund-Eving, 20/12/2019.

5 Configuración de vuelo

La configuración técnica se modificó conscientemente en cada uno de los proyectos de investigación. Esto tuvo la ventaja de que el método utilizado pudo probarse en varias plataformas y con varios sistemas de drones/cámaras. Esto coloca al procedimiento, no al *hardware*, en primer plano.

5.1 Sitebots y OPTRIS PI Lightweight

Las imágenes originales del proyecto de investigación *BigGIS* se captaron utilizando un cuadricóptero de Sitebots y un OPTRIS PI Lightweight radiométrico de 640x480px (Figura 2). Esto resultó en el material fotográfico utilizado para crear la figura 1.



Figura 2: Configuración de vuelo en el proyecto BigGIS: Arriba, el cuadricóptero Operator I de Sitebots con una cámara IR Optris PI Lightweight.

5.2 Drones de inteligencia artificial y FLIR Vue Pro R

Dado que la empresa OPTRIS solo ofrece posibilidades reducidas de influir en los datos radiométricos y depende para la evaluación en gran medida del *software* propietario de la empresa, se adquirió una FLIR Vue Pro R con una resolución de 640x512px por parte de EFTAS para el proyecto MRM. La FLIR posibilita procesar los datos radiométricos uno mismo y se puede llevar a cabo con un *software* clásico de procesamiento de imágenes. Los registros de datos en el proyecto MRM, así como los datos del depósito de almacenamiento de gas natural el 13/09/2019, se recogieron utilizando la configuración de la figura 3.



Figura 3: Configuración de vuelo en el proyecto MRM (y otros): Arriba, Drones de inteligencia artificial MC4 (adaptado) con un FLIR Vue Pro R y el TeAx ThermalCapture Grabber para una sola captura de imagen del flujo de vídeo.

5.3 Drones del mercado de masas

La figura 4 muestra la configuración utilizada para tomar las imágenes del centro de formación del cuerpo de bomberos de Dortmund. Aquí estaba disponible, además del cóptero Yuneec H520, la cámara combinada E10T (resolución de 320x240px).



Figura 4: Hexacóptero Yuneec H520 con cámaras combinadas de imagen termográfica y luz residual; Izquierda: Cuerpo Profesional de Bomberos de Dortmund con E10T; Derecha: Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Werne con CGO-ET.

6 Procesamiento de datos y algoritmos Escenario de Detección de gases

6.1 Procesamiento de imagen de detección de gases

A continuación, se presenta el proceso de procesamiento en palabras clave para todas las imágenes evaluadas en el proyecto. Cabe suponer que este procesamiento ya puede automatizarse en la mayoría de las fases de trabajo actuales. El uso de las imágenes en RGB, que suelen recogerse en paralelo, sigue planteando un problema, pues estas tienen un formato de imagen diferente en cada caso - incluso con las cámaras combinadas de luz residual IR/ RGB de Yuneec instaladas en una carcasa de *hardware*. Actualmente no se puede integrar en un único proceso de *MicMac* porque el software de código abierto asume exactamente la misma sección de imagen. Para poder hacerse, se debe continuar trabajando en su desarrollo.

Para el desarrollo metodológico se utilizó el software de procesamiento de imágenes HALCON⁴. Dado que el software se oferta con una licencia y conllevaría mayores costes necesarios para otros usos, especialmente para una posible automatización, el cotejo de coincidencias de subpíxel y la sustracción de imágenes se programaron con la ayuda del software de código abierto *OpenCV*⁵.

Para el cotejo de coincidencias de subpíxeles, todas las imágenes tuvieron que ser redimensionadas de 16 bits a 8 bits, ya que algunas funciones del *OpenCV* no permiten manejar imágenes de 16 bits. Para asegurar los rangos de valores, se determinaron los valores mínimos y máximos de todas las imágenes y se tuvieron en cuenta al redimensio-

⁴ <https://www.mvtec.com/de/produkte/halcon/>

⁵ <https://opencv.org/>

narlas. A continuación, se procesaron las imágenes de dos en dos y se determinaron los puntos clave de ambas imágenes esenciales para su cotejo (véase la imagen 5).

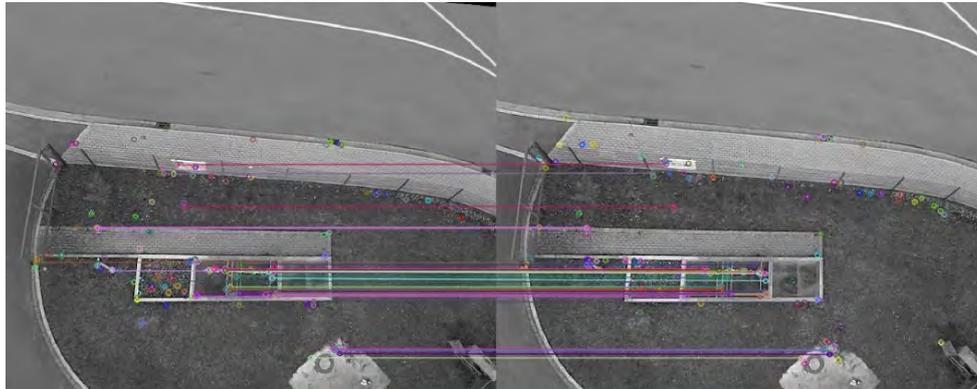


Figura 5: Puntos clave comunes en 2 imágenes.

Tras asegurarse de que los puntos clave de las dos imágenes representaban las mismas estructuras, se formaron pares de puntos clave y se calculó una matriz de homografía (véase la imagen 6). Esta matriz, calculada solo para los pares de puntos clave seleccionados, puede entonces aplicarse a toda la imagen para superponer de manera exacta la primera sobre la segunda. De este modo, se obtienen dos imágenes que encajan con precisión a nivel de píxel, aunque se hayan tomado desde ángulos diferentes. Esto se puede calcular tanto en imágenes de 16 bits como de 8 bits, dependiendo de los valores con los que se quiera trabajar posteriormente. El proceso se repite con todas las imágenes disponibles, en este caso con 81 imágenes aéreas.

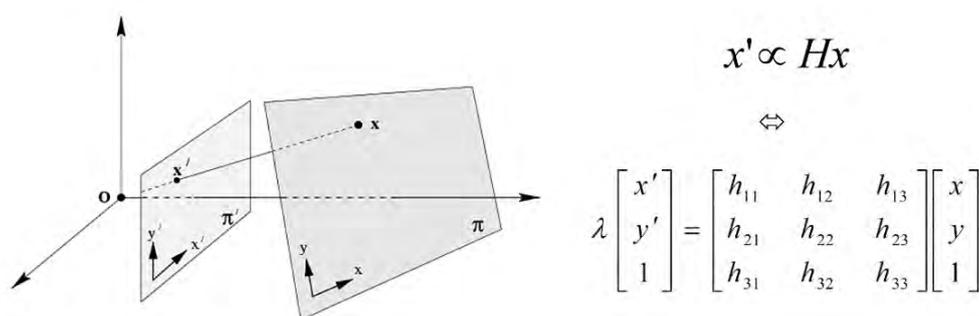


Figura 6: Dos planos de la imagen y la matriz de homografía (Gava, Bleser).

Después del cotejo de coincidencias, era necesario calcular las diferencias para poder localizar la salida de gas. En primer lugar, se enmascararon las zonas sin datos originadas al realizar el cotejo. Como los píxeles están ahora muy bien colocados unos sobre otros, la diferencia de temperatura entre dos imágenes sucesivas puede calcularse con precisión de píxeles.

Puesto que cada una de las imágenes difiere ligeramente en perspectiva debido a la corrección de la posición del dron, se aplicaron al resultado las diferentes transformaciones morfológicas. Las transformaciones morfológicas en este caso son las llamadas

erosión y dilatación (véase la Figura 7). La erosión refuerza el centro de los objetos grandes y continuos y borra todas aquellas partículas pequeñas. La dilatación, en cambio, hace que los objetos sean más grandes y, si están lo suficientemente cerca, se unen en un solo objeto. Si la erosión y la dilatación se aplican consecutivamente, se puede reducir el ruido (las diferencias debidas a las interferencias) y unir las «burbujas» del penacho de gas en un objeto más reconocible.

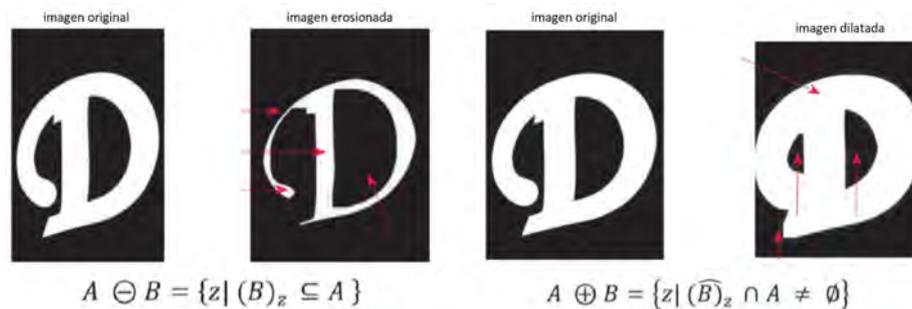


Figura 7: Erosión (izquierda) y dilatación (derecha)
(Srisha, Ravi & Khan, Am, 2013, editado).

Después, se determinó un valor umbral que parece ser significativo para una probable diferencia de temperatura. Todos los valores de diferencia por encima de este valor se incluyeron en la evaluación, todos los valores por debajo se filtraron. El resultado se almacenó en una imagen binaria, es decir, tiene píxeles negros sin gas y píxeles blancos con gas. En el último paso, las imágenes de sustracción resultantes de las diferencias de dos imágenes térmicas se sumaron a la carpeta, dando como resultado imágenes en el rango de valores 0 - 255. A estas se les puede aplicar por ejemplo escalas de colores. Al sumar muchas de estas imágenes, el efecto se potencia y las diferencias se hacen claramente perceptibles.

7 Escenarios de aplicación

7.1 Escenario de «la bombona de gas propano»

Las primeras pruebas prometedoras se simularon con el *LAGEerkunder* de EFTAS (configurado con FLIR Vue Pro R) y la ayuda de una bombona de gas propano en un aparcamiento.

La situación presentó importantes inconvenientes, que se minimizaron con algunos procedimientos manuales. Las grabaciones totales se tomaron con viento, por lo que los árboles del entorno también se movían y cada uno proporcionaba diferentes firmas térmicas en los píxeles del suelo subyacente, que se registraron en la evaluación. Por lo tanto, el encuadre de imagen se redujo. En la figura 8, una fotografía sin editar, todavía se puede ver la señalización del aparcamiento donde se encontraba la bombona de gas. No obstante, el penacho de gas se distingue por lo general de manera muy clara. Mediante procesamientos complejos de imágenes y la detección de bordes, en los que tam-

bién se evaluaron las imágenes en RGB correspondientes, se pudieron eliminar las interferencias y resaltar la huella espectral de la pluma de gas propano. La fuga de gas es claramente visible en las dos ilustraciones de ejemplo de la figura 9.

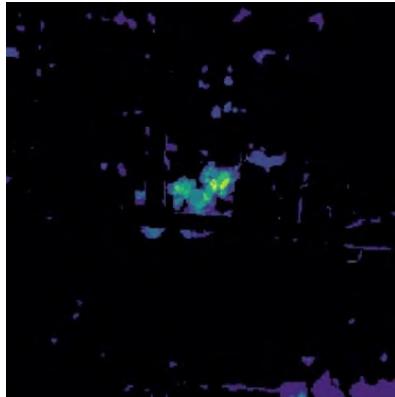


Figura 8: Encuadre de la imagen sin editar de una nube de gas que emana de una bombona de propano comercial.

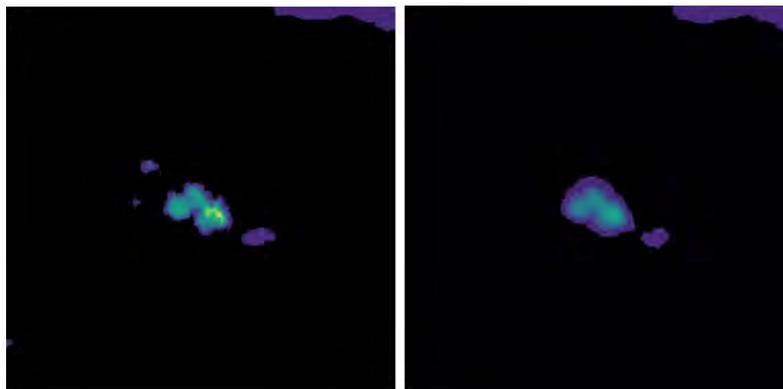


Figura 9: La nube de gas puede detectarse con suficiente claridad mediante diversos procesos de procesamiento de imágenes.

7.2 Limitación del método de presión y flujo volumétrico

Durante la simulación no se midió el flujo de gas. Una clara diferencia con la situación, por ejemplo, en la instalación de gas del depósito de almacenamiento de gas natural fue que se aplica una presión más alta de (recién llenado) 7 a 8 bares en la válvula de la bombona de gas. Esto significa que, en este caso, el gas, que se expande y enfría de forma significativa, sale de la bombona con un determinado flujo de volumen. En el Centro de Formación de Dortmund consistió en un tubo de baja presión. Este produce un flujo volumétrico que sale a un máximo de 0,5 bar. Por lo tanto, el enfriamiento es bastante improbable o marginal. Además, el flujo volumétrico no se puede medir en términos de cantidad. Según los empleados del depósito de almacenamiento de gas natural, la presión en los puntos de fuga simulados para las pruebas era aproximadamente un 50% inferior a la de una bombona de gas (3,4 bares), siendo también la circulación significativamente menor.

En un posible nuevo montaje experimental, debe realizarse una clara determinación de la temperatura, la presión y la cantidad de gas.

7.3 Centro de Formación de Pruebas del Cuerpo de Bomberos de Dortmund



Figura 10: Instalación de pruebas de incendios por gas del Cuerpo Profesional de Bomberos de Dortmund.

Junto con la recopilación de datos originales con la configuración de OPTRIS, el «original» debe recrearse con la ayuda de un dron del mercado de consumo y debe compararse con los mismos parámetros si la imagen puede reproducirse de nuevo.

La aeronave utilizada fue un Yuneec H520⁶ con la cámara termográfica y de luz residual combinada E10T⁷. Esta prueba era de gran interés, pues las constelaciones presentadas anteriormente se basaban en cámaras termográficas, cada una de las cuales proporcionaba datos radiométricos. En este caso, se utilizó una cámara no radiométrica con una resolución considerablemente inferior en una prueba similar. Esta prueba dio lugar a más conclusiones.

La Yuneec E10T también se basa en una cámara termográfica FLIR, en la prueba con una resolución de 320 x 240px (Figura 4). La figura 11 muestra una vista de la planta desde una altura de unos 50 metros. Los datos se modulan en un Strom MP4 en diferentes canales de esta cámara y ocupan una sola película de vídeo. La primera observación mostró (al igual que la prueba en el depósito de almacenamiento de gas natural) una fuga de gas supuestamente reconocible en el canal de la cámara termográfica. Por lo tanto, la evaluación se llevó a cabo según el esquema descrito anteriormente y dio muy buenos resultados.

⁶ https://www.yuneec.com/de_DE/kommerzielle-drohnen/drohnen/h520/uebersicht.html

⁷ https://www.yuneec.com/de_DE/kommerzielle-drohnen/kameras/e10t/uebersicht.html

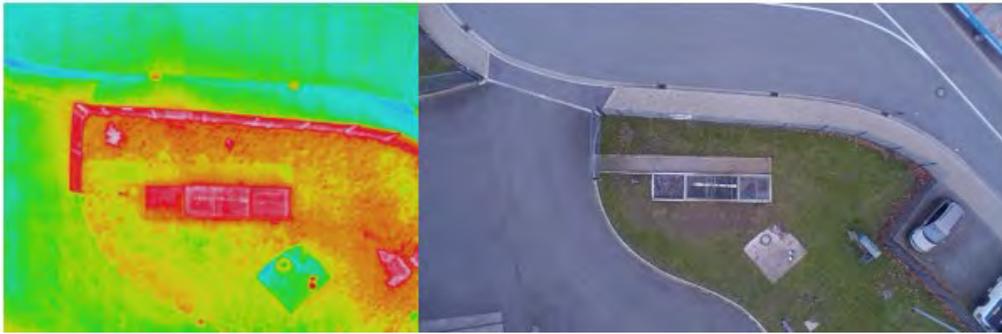


Figura 11: Instalación de entrenamiento de gas (metano en la tubería de baja presión) del Cuerpo Profesional de Bomberos de Dortmund, tomado con un equipo de cámara Yuneec H520 y E10t.

La figura 12 y la figura 13 muestran un resultado excelente para este tipo de cámara y todo un éxito de las pruebas en Dortmund. El resultado demuestra que a.) el método en principio funciona y b.) es adecuado para conseguir tales resultados con drones simples del mercado de masas (valor de mercado < 1 500 euros) y equipos de cámara considerablemente más baratos (valor de mercado aprox. 5 000 euros).

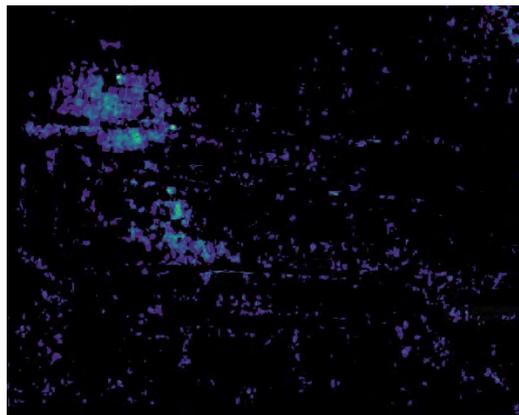


Figura 12: Resultado del cotejo de coincidencias de subpíxel y sustracción de 28 imágenes individuales.

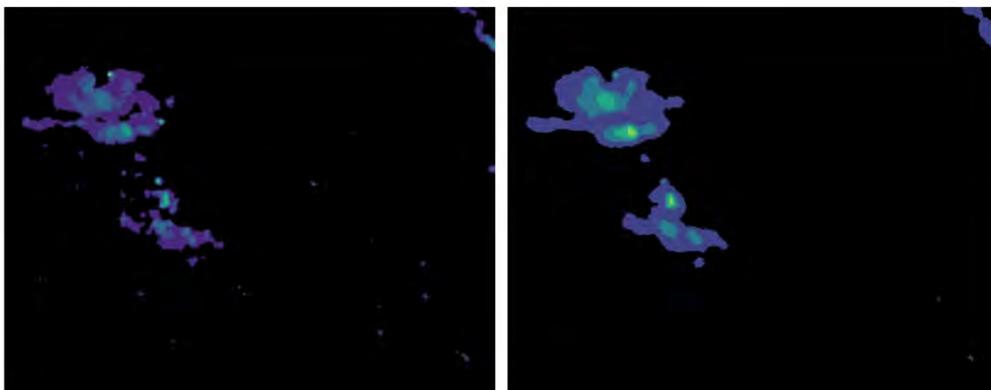


Figura 13: Al igual que en las pruebas de Gelmer o en el proyecto BigGIS, la pluma de gas también se puede extraer con una cámara de menor resolución y no radiométrica.

La figura 12 muestra el resultado de 28 imágenes individuales con un cotejo de coincidencias de subpíxel, que posteriormente se procesaron juntas, tal y como se ha descrito anteriormente. El tratamiento posterior, que eliminó el ruido y combinó las burbujas de gas (*Blobs*), proporciona una imagen clara georreferenciada que también puede utilizarse para derivar una coordenada del origen en el GIS.

7.4 Aplicación al caso del depósito de gas natural: límites actuales del método

Basándose en la aproximación presentada se investigaron los flujos de salida de gas bajos (hasta 3,4 bares) en la instalación de almacenamiento de gas natural, que se simuló en los sopladores de los dispositivos de medición. Los datos pudieron ser recogidos antes del proyecto IR4MRM con el *LAGEErkunder* de EFTAS. Estos datos pudieron ser evaluados de nuevo con los métodos de análisis y las herramientas informáticas desarrolladas en el presente proyecto. La recogida de datos se realizó con la configuración que se muestra en la figura 3 el 13/09/2019.

Según el personal, la fuga de gas en el depósito de almacenamiento de gas natural es baja, de hasta 40 litros por hora. Las pruebas se llevaron a cabo en dos edificios (la figura 14 muestra los lugares donde se realizaron los ensayos). Los sopladores que se muestran en la figura 14 son aparatos de medición de la calidad del gas antes de su transferencia al gasoducto de transporte. En el caso del soplador de la fotografía superior de la figura 14, fue posible regular el flujo de gas dentro de un cierto rango («débil» con unos 40 litros/hora y «fuerte» con unos 280 litros/hora). En la imagen inferior, el flujo volumétrico se fijó en unos 40 litros/hora.



Figura 14: Superficies de prueba del depósito de almacenamiento de gas natural (sopladores = marcados en rojo).

La evaluación de las imágenes se llevó a cabo en varios pasos, usando diferentes planteamientos. En primer lugar, se utilizó el software de código abierto *MicMac* para realizar la referenciación clásica. Las imágenes resultantes pudieron cargarse en el software QGIS. La revisión inicial de unas 81 imágenes individuales reveló estructuras en el tejado del edificio que sugerían una fuga de gas.

El curso del sombreado visible se dirige de norte a sur, por lo que en principio se puede tratar de una pluma de gas metano, ya que la temperatura de la superficie del techo se solaparía por el gas fugado. Sin embargo, el efecto puede describirse como débil y no avanza más allá del techo por encima del suelo.

Consideraciones sobre esto condujeron inicialmente a cuatro posibilidades:

- La temperatura superficial tiene en el rango de resolución térmica de la cámara la misma o casi la misma temperatura que el gas fugado. En este caso, ni una cámara termográfica ni el método en general pueden detectar las diferencias.
- La temperatura de la superficie del tejado del edificio se ve más fuertemente modificada por el gas fugado (mayores diferencias de temperatura) que aquella del suelo circundante. No obstante, el metano tiene una enorme capacidad de absorción de temperatura, lo que debería significar que la absorción también se percibe por encima de la superficie del suelo frente al edificio, si no entra en juego el siguiente punto:
- La masa de gas es, por lo general o por razones de rarefacción (remolinos en el borde del techo del edificio), demasiado baja para que la temperatura superficial «que irradia» el suelo se vea influida de forma significativa o para que se produzca una absorción significativa de la temperatura.
- El sombreado (aunque unidireccional) procede de los reflejos del tejado del edificio, que se captan de forma ligeramente diferente de una imagen a otra debido al movimiento del dron. La dirección fijada es causada por el «balanceo» del dron alrededor del eje longitudinal (alabeo, figura 15; debe ser compensado por el gimbal) o a correcciones de posición (Figura 16) en caso de influencia del viento.

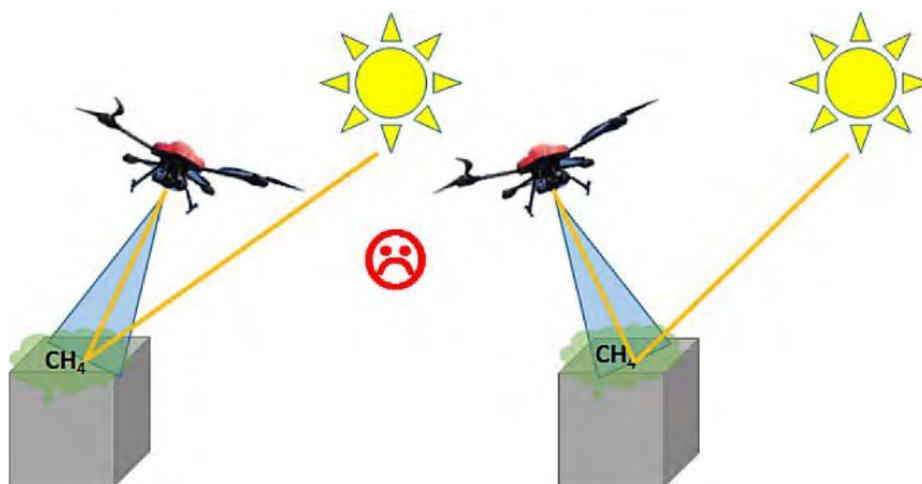


Figura 15: Impacto en la adquisición de valores al inclinar el dron alrededor del eje vertical.

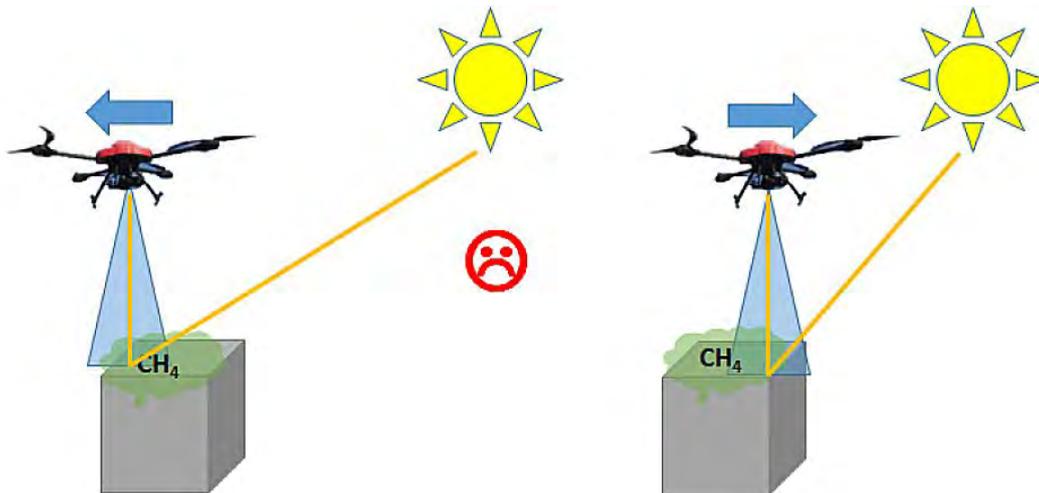


Figura 16: Impacto en la adquisición de valores mediante la corrección de la posición del dron.

En cualquier caso, la simple superposición de las imágenes georreferenciadas mostró un «efecto» que debe ser investigado más a fondo. Las tres reflexiones expuestas se traducen en que la aplicación del cotejo de coincidencias de subpíxeles a las imágenes proporciona un mayor valor informativo.

Al contrario que en el escenario con *BigGIS* o en la posterior prueba en Dortmund, en que el flujo volumétrico emanó de una tubería de baja presión, el flujo de salida de gas del depósito de almacenamiento era muy bajo y fue reducido a unos 3,4 bares por los sistemas de medición anteriores. El volumen fue en este caso inferior que en los casos presentados anteriormente. Sin embargo, el flujo no se registró, lo que limita las conclusiones científicas.

Si bien una sección del personal de la planta dijo que esta se encontraba bajo presiones de entre 70 y 210 bares. Los defectos en las tuberías, las bridas y las piezas de la instalación serían, pues, ya audibles y fáciles de localizar. Por lo tanto, la baja pérdida de gas es el foco principal de la investigación. No obstante, si se piensa en el seguimiento de la planta, aquellas partes que están lejos de la estación central de compresión también pueden ser incluidas en la supervisión. En este sentido, cabe destacar las cabezas de pozo distribuidas por una amplia superficie.

7.5 Resultado y evaluación de la vista aérea del depósito de almacenamiento de gas natural

En primer lugar, se observa que la georreferenciación clásica (como ya ocurre en el proyecto *BigGIS*) no proporciona una base suficiente para el posterior procesamiento de las imágenes (Figura 17, ilustración de la izquierda).

Sin embargo, la imagen 17 también muestra el problema que afecta enormemente al resultado: En estas imágenes, solo se muestran las diferencias de temperatura sumadas. Los contornos de la planta salen a la luz cuando se aplica el modelo expuesto. El motivo es que las diferencias de temperatura se calculan generalmente porque el método asu-

me que una pluma de gas altera las temperaturas del subsuelo correspondiente mediante la absorción. Si la pluma de gas se desplaza por encima del subsuelo, los píxeles correspondientes aparecen en un rango de valores diferente de imagen a imagen. Este efecto debería potenciarse según el planteamiento metodológico tomando múltiples imágenes en la misma ubicación y diferenciando los respectivos píxeles de modo que la fuga de gas pueda visualizarse como en la figura 1.

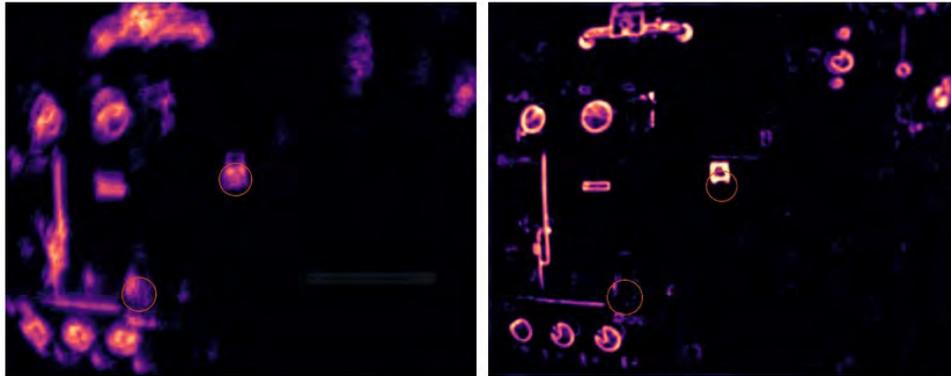


Figura 17: Aumento de la precisión gracias al cotejo de coincidencias de subpíxeles; Izquierda: visualización de resultados con imágenes georreferenciadas de manera clásica (imágenes sin cotejar), Derecha: visualización de resultados con corrección a nivel de píxel (imágenes con cotejo de coincidencias) - Los contornos de las plantas se representan con mucha más claridad en las imágenes IR.

¿Por qué los contornos de las plantas destacan tan claramente? La pregunta se justifica porque se deduce que las plantas no cambian térmicamente de imagen a imagen y a corto plazo tienen más o menos la misma temperatura superficial. La explicación reside en el movimiento del dron en combinación con el ángulo de apertura del objetivo. Como se muestra en la figura 16, un dron se desplaza en torno a una posición determinada y va corrigiéndola para mantener esa predeterminación. La estabilidad de este proceso depende de varios factores. Por un lado, el viento influye en la estabilidad del vuelo. Si el dron se desvía, debe corregir su posición. Pero también los valores de posición que el módulo GNSS⁸ del dron obtiene de las señales temporales del GNSS muestran una precisión limitada. Se puede considerar que el módulo GNSS instalado en el dron puede determinar con precisión una posición inferior a 3 metros. Esto resulta en un desplazamiento de la aeronave, que a su vez afecta a la perspectiva de la imagen correspondiente al ángulo de apertura del objetivo. Un edificio es, por tanto, capturado desde la vertical superior, y ligeramente desde el lateral. Si se superponen varias de estas imágenes, los bordes del edificio «saltan» como máximo esta cantidad. Esto significa que en un mismo lugar (de un píxel concreto), se registra de una vez el suelo, el techo y, posiblemente, otra parte del edificio (Figura 18). En un píxel examinado, esto hace que los valores de temperatura cambien de una imagen a otra; el modelo no puede distinguir este cambio marcado de temperatura en la insta-

⁸ GNSS son las siglas de *Global navigation satellite system* (Sistemas Globales de Navegación por Satélite, como el GPS estadounidense, el GLONASS ruso o el Galileo europeo).

lación de almacenamiento de gas natural por diferencias de altitud, de aquellos cambios considerablemente menores causados por la pluma de gas con bajo flujo volumétrico.

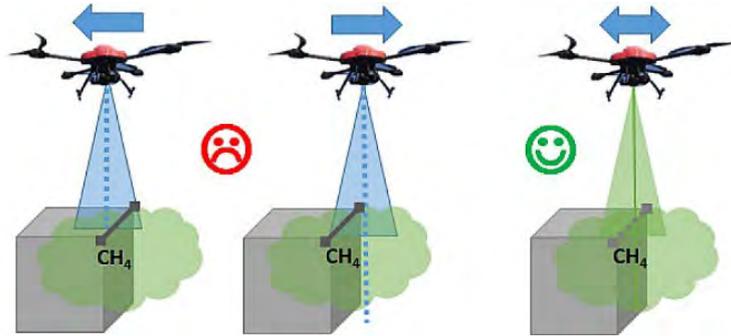


Figura 18: Captura de valores en la posición del dron dentro de la precisión del GNSS. La detección de gas solo es posible si se puede incluir el borde del edificio (a la derecha en la imagen).

Tres enfoques podrían evitar este efecto:

- Es concebible definir una forma con los contornos del edificio como áreas sin datos. El modelo omite estas áreas de los bordes del edificio y calcula solo las áreas restantes (techo, suelo, etc.).
- Este efecto se puede intentar filtrar mediante la detección de bordes en las imágenes en RGB capturadas simultáneamente (cf. las pruebas de gas propano en Gelmer, Figura 8 y Figura 9).
- Se puede utilizar un módulo de cinemática en tiempo real (RTK) para lograr una mayor precisión del GNSS.

Esta última solución, sin embargo, parece limitada. Porque, aunque se pueda minimizar el error del GNSS a unos pocos centímetros, sigue existiendo el problema con el cálculo de la ortofoto de que el ángulo de apertura de la cámara proporciona diferentes perspectivas de un edificio. Es probable que la creación de la llamada ortofoto verdadera (*True-Ortho*), de la que se han eliminado estos efectos, afecte a los valores radiométricos a través los procesos necesarios de tal manera que solo sean posibles afirmaciones limitadas.

No obstante, el método se ha confirmado fundamentalmente (como se ha mostrado anteriormente) y ha dado resultados útiles varias veces con diferentes equipos. En el caso de la aplicación del depósito de almacenamiento de gas natural, todavía hay problemas evidentes a la hora de encontrar resultados con la situación especial del edificio y posiblemente el flujo volumétrico minúsculo del metano liberado. Sin embargo, todavía no se ha demostrado que el método haya fallado de manera general en este escenario. Si se observa con detalle (entre los bordes del edificio), se puede ver claramente el efecto descrito más arriba de un cambio de temperatura dirigido de norte a sur tras el cotejo de coincidencias de subpíxeles. En la figura 19, esto se puede percibir por los equipos de medición en varias imágenes detalladas del techo del edificio con el escape: Los bordes del edificio son siempre (extremadamente) pronunciados, pero en la super-

ficie entre ellos hay cambios igualmente pronunciados que se muestran aquí en las diferencias entre varios pares de imágenes. Como se ha descrito anteriormente, no se puede descartar que este efecto se origine por el movimiento del dron, pero los patrones permiten también interpretar el origen en una fuga del techo desde la pluma de gas metano.



Figura 19: Vista detallada del edificio «sistema de medición».

8 Conclusión y perspectivas

Si las fotografías de las cámaras termográficas se someten a una precisa georreferenciación, al método de cotejo de coincidencias de subpíxel y a la subsiguiente sustracción de pares de imágenes, es posible, bajo ciertas condiciones, visualizar el gas fugado e invisible al ojo. La ventaja del método es el hecho de que las mediciones pueden realizarse desde una mayor altura (por ejemplo, por encima de áreas peligrosas o zonas de protección contra explosiones) sin poner en peligro al personal de emergencia ni afectar a la nube de gas por las turbulencias del rotor. El método también parece ser aplicable con modelos de precio razonable, independientemente del sensor. Aquí existen limitaciones en la resolución geométrica, ya que la altitud de vuelo necesaria está definitivamente influida por esto. Se pudo mostrar cómo el método conduce a un resultado de éxito con diferentes constelaciones de dron con cámara termográfica en diferentes escenarios (tubería de baja presión, bombona de gas propano).

Al mismo tiempo, el método sigue estando sujeto a limitaciones: El caso del depósito de gas natural muestra que el método todavía tiene sus límites cuando la situación ambiental en combinación con el movimiento inherente del dron produce diferencias más fuertes que un solapamiento de gas.

En este caso, se mostraron los planteamientos para resolver el problema.

En septiembre de 2020 se aprobó una propuesta de investigación de EFTAS y la THGA (junto con los socios industriales) como parte de la convocatoria «Investigación para la seguridad civil». En el proyecto *CavernMonitoringSystem* (KaMonSys), se va a crear un plan de vuelo 3D de alta precisión para el seguimiento con el fin de obtener más datos de entrada para tener en cuenta la situación del edificio. En perspectiva, una solución al problema podría ponerse en marcha a partir del tercer trimestre de 2022.

Referencias

- Bernsdorf, B.; Löw, F.; Edner, D. & Judex, M.; (2017/1): Big Data beim Feuerwehreinsatz. - in: Feuerwehr-Magazin 12/2017, Bremen, S. 80 - 86.
- Bernsdorf, B.; Löw, F.; Edner, D. (2017/2): Fernerkundung im Feuerwehreinsatz - Teil 1. - in: FEUERWEHReinsatz:nrw 12/2017, Verbandszeitschrift des Verbands der Feuerwehren Nordrhein-Westfalen (VdF NRW), S. 13 - 16.
- Bernsdorf, B.; Löw, F.; Edner, D. (2017/3): Fernerkundung im Feuerwehreinsatz - Teil 2. - in: FEUERWEHReinsatz:nrw 01-02/2018, Verbandszeitschrift des Verbands der Feuerwehren Nordrhein-Westfalen (VdF NRW), S. 22 - 28.
- BigGIS (2018): Disaster Management - New Solution Concepts within the BigGIS-Project.- in: Projekt-WebSite BigGIS -Scalable GIS for Predictive and Prescriptive Analytics, Forschungszentrum Informatik, Karlsruhe, Online: <https://kurzelinks.de/evzg>.
- DLR Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (2020): Katastrophenschutz und Krisenmanagement. - in: WebSite des Copernicus- Programms, Köln, Online: <https://kurzelinks.de/9mvd>.
- Fabian, P (1996): Kohlenstoffdioxid und andere Treibhausgase: Luftverschmutzung und ihre Klimawirksamkeit. - in: Praxis der Naturwissenschaften Chemie. 45(2), S. 2 ff.
- FLIR (2020): Radiometrische Wärmebildkamera für Drohnen - FLIR Vue Pro R.- in: Unternehmens-WebSite der Firma FLIR Systems Inc.; Online: <https://kurzelinks.de/c9kp>.
- Formaniuk, A. (2019): Real-time smoke detection in video sequences to support UAV instant flight adjustment for firefighting purposes.- Bachelorarbeit im Fach Geoinformatik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, Münster, 46 Seiten.
- Gava C., Bleser G.: 2D projective transformations (homographies); Online: <https://kurzelinks.de/fyqn>.
- Glock, K.; Meyer, A. & Bernsdorf, B.; Woditsch, S. (2018): Micro Rapid Mapping: Automatic UAV-based Remote Sensing for Chemical Emergencies. - in: GI_Forum 2018, Volume 1, Salzburg, S. 90 - 104 (Online verfügbar unter: <https://kurzelinks.de/3580>; ISBN-13 Online: 978-3-7001-8359-4).
- OPTRIS (2020): Wie funktioniert eine Wärmebildkamera. - in: Unternehmens-WebSite der Firma OPTRIS GmbH; Online: <https://kurzelinks.de/9jro>.
- Rüffer, M. (2019): Warum Wärmebildkameras für Sicherheit im Innenangriff sorgen - Orientierungshilfe für Atemschutztrupps.- in Feuerwehr-Magazin, Online: <https://kurzelinks.de/3u75>.
- Srisha, Ravi & Khan, Am. (2013). Morphological Operations for Image Processing: Understanding and its Applications.

Wienecke, F. (2013): Nutzung von Wärmebildkameras zur Personensuche und Lageerkundung im Feuerwehreinsatz über größere Entfernungen. – BRANDSCHUTZFORSCHUNG DER BUNDESLÄNDER.

Forschungsbericht 172, Heyrothsberge, 185 S.; Online: <https://kurzelinks.de/sn4i>.

Workswell (2020): WIRIS Security für Sicherheits- und Suchanwendungen. – Unternehmens-WebSite der Firma Workswell s.r.o.; Online: <https://kurzelinks.de/Ophy>.

Publicado por primera vez en: vfdb - Zeitschrift für Forschung, Technik und Management im Brandschutz, 1/2021, S. 22-31.

Uso de drones en las industrias minera y energética - Mejora de la gestión de riesgos y de la comunicación con los stakeholders

Bodo Bernsdorf, Tobias Rudolph, Peter Goerke-Mallet

Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

1 Introducción

Recientemente, la empresa consultora EY ha publicado los resultados de su encuesta anual sobre las principales empresas mineras internacionales (1). Así, la pérdida de la «licencia para operar» sigue considerándose el mayor riesgo empresarial. La licencia de explotación de minas tiene un componente legal y otro social para las empresas. Sin el consentimiento de los *stakeholders* (es decir, de todos los representantes y afectados) la explotación de las minas es prácticamente imposible.

De hecho, Georg Agricola ya se ocupó de la licencia social para operar (en inglés, «*social license to operate*») en su manual básico de minería y metalurgia *De re metallica* (2). Concretamente, en el primer libro titulado *Vom berg- und hüttenmännischen Beruf und seinem Nutzen*, aborda los argumentos del público crítico con la minería. Su análisis de los daños inducidos por la minería al medio ambiente y los beneficios que las actividades mineras aportan a la sociedad puede entenderse como un planteamiento de la gestión de riesgos. Como erudito observó, interpretó y extendió la minería, sus peculiaridades y su impacto. El Centro de Investigación Posminera (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN por sus siglas) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) se inscribe en la tradición de la escuela que lleva su nombre. Esto se refiere particularmente a la visión holística de la minería y su ciclo de vida.

La satisfacción de las necesidades de la población en materias primas y energía, así como el sector industrial no es concebible sin la minería y la industria energética. Esto está relacionado con el impacto en el entorno de las minas y las plantas de producción, que no siempre puede contenerse ni espacial ni temporalmente. Para las empresas operativas y sus empleados, esto se traduce en la tarea permanente de mantener un sistema de gestión de riesgos. En este contexto, debemos hablar de una evaluación tecnológica permanente. Este reto no puede superarse sin un geomonitoreo adaptado. Los resultados de la observación del impacto de la minería en su entorno constituyen la base de una evaluación de riesgos y oportunidades sólida y significativa. Además, los datos de monitorización son absolutamente necesarios para una comunicación exhaustiva y comprometida con los *stakeholders* del proceso de la industria minera y energética.

2 Sobre el concepto de dron, UAV, UAS, cóptero y RPAS

Se cree que el término «dron» apareció por primera vez en 1932 en referencia a los aviones no tripulados y radiocontrolados que se fabricaban en gran número en Reino Unido (3). La expresión hace tiempo que se ha incorporado al lenguaje cotidiano.

El término inglés se ha tomado de la biología y se refiere al macho de las colonias de abejas o avispas, al que se le atribuye una función muy limitada. No participan en la construcción de nidos ni en otras tareas sociales de la colonia. En el caso de las abejas melíferas, ni siquiera pueden recolectar el néctar por sí mismas (4). Además, estas abejas macho solo viven durante un periodo de tiempo muy limitado. Tales características se trasladaron a un dispositivo, especialmente usado en el ámbito militar, que posee una función muy limitada, con una durabilidad corta, y que puede ser sacrificado sin grandes pérdidas (5, 6).

UAV es la abreviatura de «*unmanned aerial vehicle*», Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) en español (7). El término «UAS» se utiliza para referirse a los «*unmanned aerial systems*» (sistemas de aeronaves no tripuladas) especialmente en Estados Unidos y el Reino Unido. Para estas aeronaves también se utiliza la denominación «cóptero», a menudo en relación con su número de rotores. Hablamos, pues, de bi, cuadri, hexa u octocópteros, o, más generalmente, de un multicóptero (8).

Para completar la lista de nombres, cabe mencionar el término RPAS - *Remotely Piloted Aircraft Systems* (Sistemas de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto), que es el preferido por las agencias y organizaciones internacionales (9, 10).

En la actualidad, los drones realizan multitud de tareas, que en el contexto de este artículo se centran en la función de sistema portador de una gran variedad de cámaras y sensores. Las imágenes captadas por los drones con cámara están muy extendidas. Hoy en día, casi ningún informe de viaje puede prescindir de fotografías aéreas. Aunque las imágenes de paisajes y ciudades a vista de pájaro proporcionan una visión interesante, guardan, en cierta manera, un carácter melancólico. Casi ningún turista puede conseguir esta perspectiva por sí mismo. Por supuesto, el alto valor de interés de estas imágenes es indiscutible.

Recordando el título de este artículo, es importante señalar el considerable potencial de los vehículos aéreos no tripulados. Los drones permiten observar el entorno desde una perspectiva diferente sin mucho esfuerzo, proporcionando una visión más amplia. Este cambio de perspectiva es especialmente importante en zonas a las que el ser humano no puede llegar por diversas razones.

Los drones y los sensores que portan proporcionan un alto grado de transparencia y una mejor comprensión de los procesos que tienen lugar en el suelo y en las capas superficiales, por ejemplo, sobre los proyectos de minería subterránea. En el ámbito de la seguridad ciudadana y la protección del medio ambiente, las misiones con drones han demostrado su eficacia, por ejemplo, en la detección temprana de incendios forestales, en la ayuda a las medidas de extinción de incendios y en la identificación de la contaminación del agua.

No obstante, además de las muchas oportunidades asociadas al uso de drones, también hay que tener en cuenta los riesgos. Los drones pueden ser un enorme problema para otras aeronaves y su caída puede causar importantes dificultades en tierra.

Para garantizar que los drones sean más seguros, por un lado, y homologables para los vuelos más allá del alcance visual, por otro, existen varios enfoques. Ya existe el transpondedor como solución para esta visibilidad electrónica, el cual permite el llamado *Traffic Awareness*, es decir, la integración en el espacio aéreo, mediante una identificación única enviada de forma encriptada. El objetivo es establecer un Detect-And-Avoid (DAA), es decir, garantizar que los drones sean detectados de manera temprana por otros participantes en el tráfico aéreo y evitar así las colisiones (11). Junto con Deutsche Telekom AG, la Deutsche Flugsicherung GmbH (DSF) fundó en mayo de 2019 Droniq GmbH, una empresa conjunta que ofrece una plataforma para la localización de drones. Este sistema, denominado *UAS Traffic Management System* (UTM), se basa en un módem con tarjeta telefónica que transmite constantemente la posición del dron y el identificador unívoco a la plataforma. Para ello se utiliza la red móvil. Esto puede leerse a través de la DSF y puede incorporarse a la app del dron o también a los datos de control del tráfico aéreo (12, Figura 1).

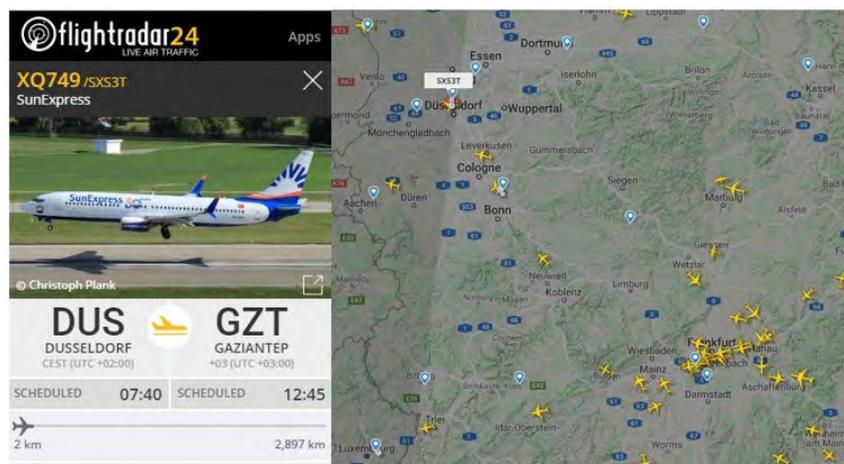


Figura 1: La incorporación de identificadores y datos de la aeronave son procedimientos habituales en la aviación tripulada y pueden consultarse libremente a través de apps, como en la aplicación Flightradar24. En el futuro, este procedimiento se aplicará también a los drones (comerciales) (Flightradar24 (13)).

3 Requisitos del sistema

A diferencia de los supuestos «drones zopencos» del mundo animal, estas plataformas portadoras son sistemas de alta tecnología y se utilizan para cada vez más aplicaciones y otras cuestiones. Esto se debe sobre todo a que los sensores también han avanzado significativamente a medida que la tecnología de los propios drones lo ha hecho. Por otro lado, es posible, con un esfuerzo comparativamente pequeño, producir geodatos y (con los conocimientos previos adecuados) también geoinformación importante (por ejemplo, ortofotos) a partir de los datos de estos sensores. En la figura 16 se muestra un ejemplo.

El sistema del dron incluye actualmente muchos sensores, como los destinados a evitar colisiones. Sin embargo, fundamentalmente se basa en la combinación del módulo GNSS (para el posicionamiento), el sistema inercial (para determinar la posición en el espacio) y algún tipo de sensor (por ejemplo, una cámara óptica), lo que, en última instancia, proporciona el valor adicional de la aplicación. Con estos tres sensores, incluso los usuarios sin experiencia pueden generar fotografías aéreas de alta calidad.

3.1 Posición

GNSS son las siglas de *Global Navigation Satellite System*. Se trata de un receptor de radar de banda L que recibe las señales horarias de los satélites de navegación de varios proveedores en esta banda de frecuencia. Un satélite GNSS transmite una señal horaria, un receptor simula esta señal exactamente al mismo tiempo y calcula la distancia al satélite a partir del tiempo de ejecución. Utilizando la distancia a muchos de estos satélites, el receptor puede calcular posiciones muy precisas: cuantos más satélites utilice el receptor, mayor será la precisión de la posición. En la fase inicial, solo se disponía del sistema estadounidense *Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*. Es comúnmente conocido como GPS o NAVSTAR-GPS. Con el término «GPS», este sistema también dio nombre a todo lo que tiene que ver con la navegación. Ya sea para hacer senderismo, en el coche o hasta en un dron: se lleva un «GPS».

De hecho, hoy en día los chips de los módulos GNSS son capaces de recibir al menos el *Global Navigation Satellite System* ruso - GLONASS, para abreviar. Si bien, NAVSTAR GPS y GLONASS son sistemas de carácter militar. En el caso de las aplicaciones comerciales, esto puede significar que, durante un conflicto militar entre los países proveedores, se restrinja significativamente la precisión del posicionamiento, o incluso que se cierre por completo para el uso civil. Hay varias posibilidades de acceso a este fin, por ejemplo, con NAVSTAR-GPS. Los militares, por ejemplo, utilizan el llamado Precise Code, que siempre garantiza una precisión métrica de una sola cifra. El usuario civil tiene libre acceso a Clear Access (CA). Esto se limitó hasta principios de mayo del 2000 sistemáticamente por la *Selective Availability (S/A)* a una precisión de posición de ± 100 m con una fiabilidad de medición del 95%. Desde mayo de 2000, los usuarios civiles también pueden alcanzar una precisión de ± 10 metros, siempre que el S/A no se reactive en conflictos militares (14).

Debido a la necesaria independencia de estos sistemas militares de las aplicaciones comerciales, por ejemplo, de transporte o logística, o por motivos de seguridad, la Unión Europea ha implantado el sistema Galileo. Desde octubre de 2011, cuando se lanzaron los dos primeros satélites desde el puerto espacial de la Guayana, el sistema se completó hasta alcanzar la plena capacidad operativa en julio de 2018. Galileo ofrece un servicio abierto, un servicio de alta precisión para aplicaciones comerciales y un acceso regulado por las autoridades públicas. Este servicio público proporciona una precisión de posición de ± 4 m y una señal horaria correspondiente a un reloj atómico con 10-13 s. Esto ya supone un aumento considerable de la precisión de la posición en comparación con el GPS. Pero lo esencial es que este servicio también está disponible en un 95% en las ciudades gracias a una constelación de satélites optimizada. El servicio de alta precisión

se puede recibir también de manera gratuita. Permite utilizar datos de corrección que mejoran la precisión posicional a nivel de centímetros. Sin embargo, este servicio puede ser encriptado, ya que inicialmente se planteó como un servicio comercial. Actualmente está disponible para aplicaciones como la minería y la topografía. Por último, el servicio regulado públicamente está disponible para los usuarios gubernamentales (fuerzas armadas, policía, guardacostas, etc.). Aquí, la señal está fuertemente encriptada y asegurada contra interferencias externas. Un avance importante en el ámbito de la búsqueda y rescate: como sistema pionero, Galileo dispone también de un «canal de retorno» y, en el ámbito de prevención de emergencias, puede recibir también datos de posición de personas en peligro o transmisiones de emergencia de barcos y aviones. Desde enero de 2020, Galileo permite incluso responder a los que soliciten ayuda. Se puede obtener información detallada en la página web de la *European Global Navigation Satellite System Agency* (GSA) (Agencia Europea del Sistema Global de Navegación por Satélite) (15).

Un papel subordinado pero cada vez más importante es el que está desempeñando el sistema chino Beidou. No se completó hasta el verano de 2020 y ahora complementa a NAVSTAR, GPS, GLONASS y Galileo con un cuarto sistema (16).

Para los usuarios, la disponibilidad de diferentes GNSS es muy ventajosa, ya que, si los chips pueden utilizar varios de estos GNSS, se obtiene una cobertura de satélite considerablemente mejorada y, por tanto, una precisión de posicionamiento mucho mayor. Las deficiencias de los chips se ven compensadas con creces por la cantidad de datos recibidos. Esto significa que incluso los drones del mercado de masas son capaces de capturar imágenes aéreas, con precisiones de posicionamiento de < 1 m. Antes esto era posible como aplicación profesional. La recepción de la señal obstaculizada por sombras o constelaciones de satélites desfavorables es básicamente cosa del pasado. Por tanto, ya no es apenas necesaria la larga planificación de la misión, ya que el dron puede despegar en cualquier momento.

3.2 Orientación

La posición por sí sola no es suficiente para la topografía y el geomonitoreo. El segundo sensor esencial para una buena fotografía aérea es el *Inertial Measurement System*- IMU o sistema inercial. Un sensor IMU proporciona información sobre la posición tridimensional del dron en el espacio. La información de la posición se compone de los ángulos de guiñada, alabeo y cabeceo (también llamados ángulos de azimut, de alabeo e inclinación). Guiñada y azimut nombran la orientación del vehículo en relación con la rosa de los vientos, es decir, la rotación alrededor del eje vertical. El ángulo de alabeo proporciona información sobre la rotación en el eje longitudinal y el ángulo de cabeceo o de inclinación describe la rotación alrededor del eje transversal, es decir, si la «nariz» del vehículo sigue apuntando hacia arriba o hacia abajo (Figura 2).

Junto con la posición del píxel central de la imagen, el ángulo de apertura del objetivo de la cámara y la indicación de la altura, tanto la posición exacta sobre el terreno como la escala de sección de la imagen deben ser calculadas mediante métodos fotogramé-

tricos (para una mejor comprensión, en la figura 3 se muestra el ejemplo de alabeo). Esto es lo que hace que la georreferenciación de la imagen sea concebible.

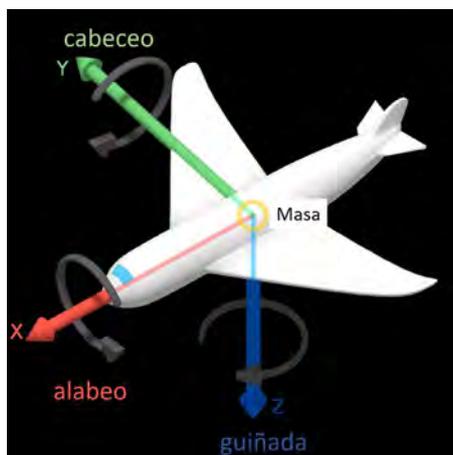


Figura 2: Ejemplo de alabeo, cabeceo y guiñada; Georg Eckert / CC BY-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>, editado).



Figura 3: Utilizando el ejemplo del alabeo alrededor del eje longitudinal de un dron, se puede percibir que exactamente en la misma posición del dron se capta en la imagen aérea una superficie de suelo diferente. Con los datos del IMU se pueden determinar estos valores y generar imágenes aéreas óptimas. Fuentes de imágenes: Dron: DJI bajo CC BY-CA (<https://1rygll2mc0uf2r05dx165m4k-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2018/08/s4-zoom-b458b254ca10f1a813d80c4726d54335.png>); Foto aérea: DOP OpenData NRW (https://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dop).

3.3 Sensores

Si el conocimiento aviónico sobre el GNSS y el IMU (es decir, la posición en el espacio tridimensional) es un prerequisite técnico básico para el vuelo seguro del dron, en consecuencia, también proporciona la base técnica para una correcta georreferenciación de las imágenes resultantes del vuelo del dron.

La avanzada tecnología de los sensores permite hoy en día encontrar el sensor adecuado para cada fin. Así, en el presente trabajo se describirán cinco ejemplos de sistemas de sensores de imagen (cámaras): La clásica cámara fotográfica y de vídeo en el rango

espectral de la luz visible (abreviado: cámara RGB), las cámaras multispectrales con transición al infrarrojo, la cámara hiperespectral con multitud de canales de entrada, la cámara térmica infrarroja (cámara termográfica) así como el sensor láser o LiDAR. Además, existen muchos otros sensores como los de medición directa de gas, pero no se describirán en este trabajo. La figura 4 (más detallada en 26) sirve para ilustrar el área de alcance.

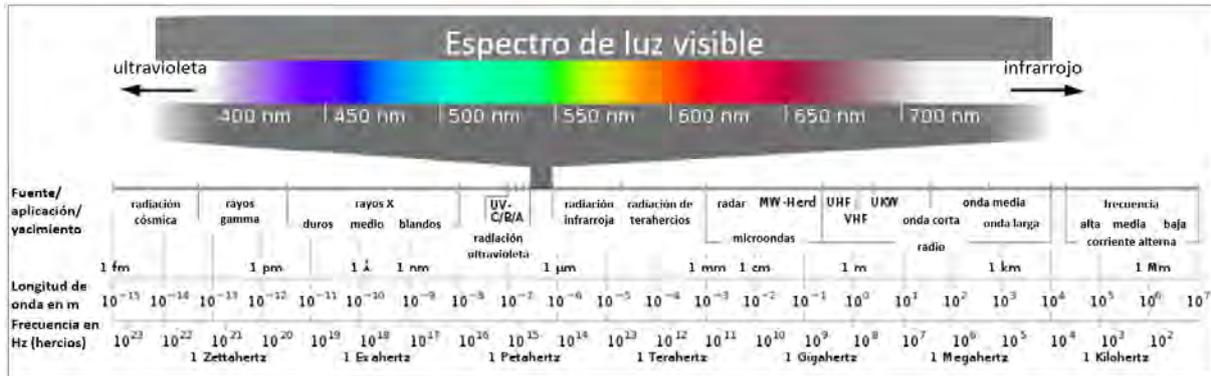


Figura 4: Visión general del espectro de ondas electromagnéticas; Horst Frank / Phrood / Anony / CC BY-SA (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_-de_c.svg, ediato).

El capítulo explica de manera resumida la tecnología. No se pretende ofrecer una perspectiva general del mercado, pero es inevitable nombrar a los fabricantes para citar las fuentes.

3.3.1 Las clásicas cámaras RGB

En el plano de las cámaras comunes de fotografía o vídeo, existe una enorme gama de ofertas. Estas cámaras registran tres rangos espectrales de luz visible, a saber, el rojo, el verde y el azul, cada uno en bandas diferentes. Se trata de un modelo de color aditivo que puede representar al menos 16 millones de colores mediante la mezcla/superposición de diferentes intensidades de las fracciones correspondientes. Suficiente para cubrir «todos» los colores considerados por el ser humano.

Incluso las cámaras de drones simples y económicos ofrecen resoluciones geométricas de unos 13 megapíxeles. Como ejemplo, consideremos la cámara del Yuneec Mantis Q, un dron del mercado de masas por < 400 euros. La cámara tiene un chip CMOS de aproximadamente un tercio de pulgada y, por tanto, es capaz de almacenar 3 840 x 2 160 píxeles en formato JPG. La opción de vídeo ofrece imágenes ya estabilizadas de 1 920 x 1 080 píxeles y puede capturarlas a 30 fotogramas por segundo (fps). Esta cámara consigue 60 fps con 1 280 x 720 píxeles. También es posible un 4K con 3 840 x 2 160 píxeles, pero ya sin la imagen estabilizada (17).

Esto describe aproximadamente el límite inferior de lo que es posible y tiene una alta calidad de imagen (Figura 5). En cambio, en el plano de los drones del mercado de masas, la competencia se mueve hacia resoluciones cada vez más altas. Incluso el DJI Mavic

2 Pro (Figura 6, 18) ofrece una cámara Hasselblad por unos 1 500 euros, que consigue 20 megapíxeles en un chip CMOS de una pulgada con una resolución de imagen de 5 472 x 3 648 píxeles. El vídeo también consigue el 4K, pero la frecuencia de refresco ha aumentado a 120 fps en comparación con el Mantis Q de 1920 x 1 080 píxeles. El chip grande garantiza una alta intensidad de luz (hasta ISO 12 880) y tiempos de exposición cortos (hasta 1/8 000 s), lo que supone una gran ventaja para las tomas aéreas.

La tendencia se mantiene. Cada vez hay cámaras de mayor resolución geométrica en el mercado. Sin embargo, para una buena fotografía aérea, también es importante que las cámaras tengan el llamado obturador global. Se trata de un obturador de cámara que es capaz de iluminar todo el chip simultáneamente. El contrario, el *Rolling Shutter*, siempre libera una sola tira de píxeles en un momento concreto. Esta tira abierta «rueda» por la imagen. Si el dron se mueve durante este tiempo, el resultado son imágenes borrosas que tienen una utilidad reducida, especialmente en la creación de composiciones de imágenes, porque los puntos de control no se pueden identificar con claridad. Dado que un dron está siempre en movimiento debido a las correcciones de posición, este es un aspecto importante para que las cámaras RGB sean útiles.

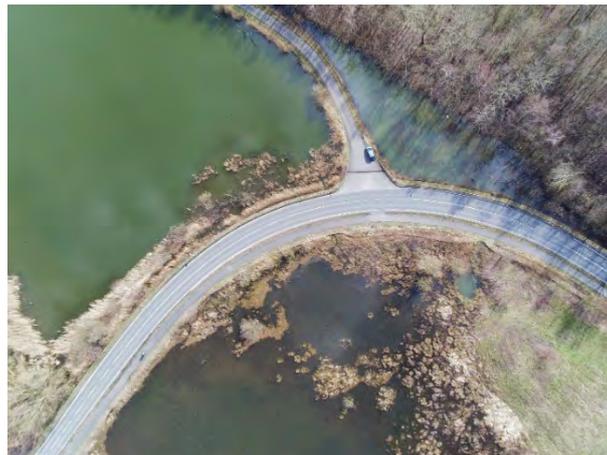


Figura 5: Imagen tomada con un dron Yuneec Mantis Q con cámara de 13 MP; La imagen muestra subsidencia minera en la zona de Werne-Stockum cerca del Datteln-Hamm-Kamal.



Figura 6: Dron plegable DJI Mavic 2 Pro con chip CMOS de 1 pulgada y resolución de imagen geométrica de 20 MP (Bomberos de Werne).

3.3.2 Cámaras multispectrales

Para aplicaciones especiales (por ejemplo, la cartografía de la vegetación)-, algunos rangos de longitudes de onda son de especial importancia. En el ámbito de la «posminera»¹, es necesario vigilar el cambio y la vitalidad de la vegetación, ya que los movimientos del suelo pueden hacer que las aguas subterráneas, y posiblemente también contaminantes como el metano, penetren en las raíces. Ambos pueden calcularse con la ayuda de índices de vegetación, por ejemplo.

El término cámara multispectral se refiere simplemente a una cámara que utiliza varios canales para captar bandas de longitud de onda. Esto también convertiría a la cámara RGB en una «cámara multispectral», ya que capta en tres bandas de longitud de onda.

Por otro lado, en el ámbito de la tecnología de drones se están extendiendo las cámaras multispectrales, que, además de los clásicos sensores RGB, tienen otros sensores de longitud de onda que resultan interesantes para la cuestión. Se trata, por ejemplo, de rangos de longitud de onda que son de importancia para la evaluación de la vegetación. La MicaSense RedEdge-MX, por ejemplo, es una cámara que también tiene el llamado canal *Red Edge* y una banda en el infrarrojo cercano. Las longitudes de onda cubiertas se indican en el centro del sensor de la siguiente manera (19):

- Infrarrojo cercano: 842 nm (57 nm de ancho de banda)
- Borde rojo: 717 nm (12 nm ancho de banda)
- Rojo: 668 nm (14 nm de ancho de banda)
- Verde: 560 nm (27 nm de ancho de banda)
- Azul: 475 nm (32 nm de ancho de banda)

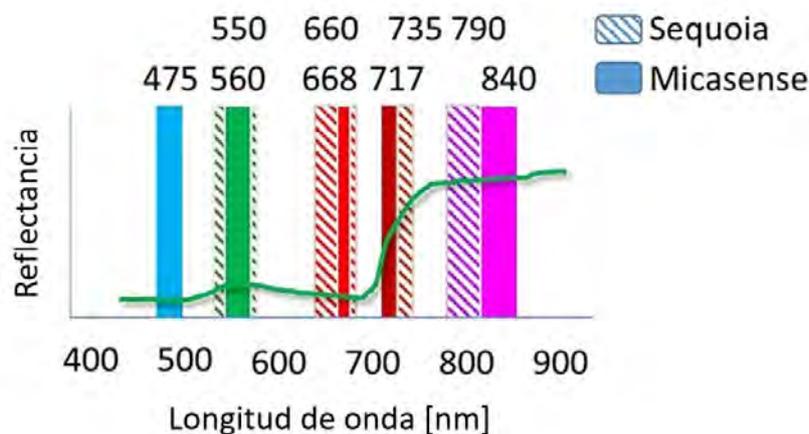


Figura 7: Comparación de los anchos de banda de los sensores en la Parrot Sequoia y la MicaSense MX (22, editado).

¹ N. de T.: Se utilizan los términos «posminero», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

El sensor de borde rojo es de especial interés en este caso, ya que la clorofila absorbe casi por completo la parte visible de la luz para realizar la fotosíntesis. Sin embargo, para no sobrecalentarse, la vegetación refleja una gran proporción de la radiación en el infrarrojo cercano, lo que se aplica particularmente al rango entre 680 y 730 nm, el llamado borde rojo, es decir, la transición al espectro de ondas infrarrojas (20).

La Parrot Sequoia (21) es una cámara comparable. Sin embargo, investigaciones de la Universidad de Rostock han demostrado que el MicaSense-MX tiene bandas espectrales más estrechas y, por tanto, puede trabajar con más precisión que la Sequoia. Dependiendo de la cuestión, esto puede ser relevante.

3.3.3 Cámaras hiperespectrales

El aumento de las capacidades de las cámaras multiespectrales se ve en las cámaras hiperespectrales. Son aplicables en muchos ámbitos y utilizan la «huella espectral» de los elementos. En relación con la luz, cada elemento químico tiene tres aspectos que se correlacionan entre sí. Se trata de la reflectancia, la absorción y la transmisión de la radiación. En el espectro infrarrojo, esto se traduce en firmas infrarrojas que pueden asignarse de manera unívoca a un único elemento o compuesto químico, lo que, finalmente, constituye una base para la identificación del elemento.



Figura 8: Espectro de absorción del metano (CH_4) en fase gaseosa (23, editado).



Figura 9: Cámara hiperespectral Cubert 185 UHD Firefly montada en un dron.

Con este conocimiento, se pueden evaluar los datos hiperespectrales. En las pruebas realizadas en el marco del proyecto de Big Data BigGIS (24) financiado por el Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Ministerio Federal de Educación e Investigación de Alemania) a través de la gestión de proyectos del DLR (Centro Aeroespacial Alemán), se instaló la cámara hiperespectral Cubert 185 UHD FireFly en un dron y se sobrevolaron varios escenarios (Figura 9). La cámara disponía de 125 canales, con una resolución espectral de 4 nm que iba de 450 nm a 950 nm. Las pruebas tenían como objetivo detectar determinadas sustancias químicas en los gases de escape. Como en los experimentos no se permitió esparcir sustancias peligrosas para el medio ambiente, se realizó una prueba de concepto. En un fluido de niebla convencional, se empleó clorofila de la industria alimentaria que se evaporó. La figura 10 muestra que esto se puede lograr.

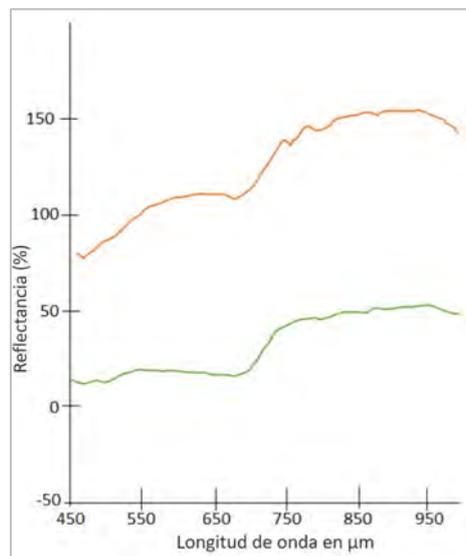


Figura 10: El trazado espectral de la nube de humo (curva roja) con clorofila mezclada reproduce casi perfectamente el curso de una franja de hierba vecina (curva verde).

Esta característica de las cámaras hiperespectrales las predetermina a ser ampliamente utilizadas en la minería y la industria. El Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) (Instituto Fraunhofer de Optrónica, Tecnologías de Sistemas y Explotación de Imágenes) ha desarrollado, sobre esta base, un método para la prospección de materias primas y para la monitorización de los daños medioambientales causados por las actividades mineras, usando cámaras de la empresa Cubert y la cámara AISA Eagle II de Specim para su uso en drones (25). En la búsqueda de materias primas se utilizan las diferentes propiedades espectrales de menas, minerales y rocas. No obstante, este método solo funciona en zonas libres de vegetación. Ahora bien, en este caso, los yacimientos cercanos a la superficie pueden ser cartografiados directamente usando cámaras hiperespectrales. Esto se suele hacer en combinación con los datos de los satélites hiperespectrales que sobrevuelan primero una zona. Si el análisis de los datos satelitales de resolución gruesa muestra resultados positivos iniciales, los hallazgos pueden verificarse localmente con drones y cámaras hiperespectrales de alta resolución.

3.3.4 Cámaras termográficas

En un rango estrecho de la radiación infrarroja térmica, las cámaras termográficas o las llamadas cámaras infrarrojas (cámaras TIR) capturan un rango espectral que el ser humano no puede ver, pero sí sentir: la radiación térmica. La radiación térmica se encuentra en el rango del infrarrojo medio, entre 3 000 nm y 50 000 nm y, por tanto, mucho más allá de la luz visible para nosotros (380 nm a 780 nm) en el rango de longitud de onda del espectro (26). El modo de acción consiste en que toda sustancia o cuerpo emite radiación térmica. Una cámara termográfica del mercado las capta a través de una óptica recubierta de aleaciones de germanio o de sales de zinc y concentra la radiación, generalmente en longitudes de onda entre 7 000 y 14 000 nm, en una matriz denominada plano focal, que es un microbolómetro que responde a la radiación térmica en pocos milisegundos y envía un impulso eléctrico al exterior. Mientras tanto, estos microbolómetros de las cámaras termográficas de las marcas FLIR y OPTRIS solo tienen un tamaño de unos 17 000 nm x 17 000 nm (!) y siguen siendo capaces de registrar radiación térmica a distancias de hasta 12 km (27, 28).



Figura 11: Cámaras termográficas aptas para dron FLIR Vue Pro R con TeAx Thermal-Capture Grabber (izquierda en comparación con una cámara SONY QX1-RGB) y OPTRIS PI Lightweight (derecha). Ambas cámaras pesan alrededor de 100 g y ofrecen una resolución óptica de 640x512 píxeles, a través de la cual son capaces de obtener datos radiométricos mediante el ThermalCapture Grabber.

El desarrollo de las cámaras ha progresado en dos aspectos: por un lado, la miniaturización de los chips ha avanzado de manera que hoy en día se dispone de resoluciones geométricas considerablemente más altas para la misma superficie o de resoluciones similares en una superficie más pequeña de lo que era concebible hace 10 años. Además, la reducción del chip también sentó las bases para que el dispositivo en general fuera pequeño y ligero, de modo que el funcionamiento del dron fuera el más extendido posible. Por ejemplo, una empresa checa ofrece una cámara de imagen térmica para vehícu-

los aéreos no tripulados con una resolución geométrica de 800 x 600 píxeles y un peso de solo 780 g (28). Las cámaras de FLIR y Optris mencionadas pesan tan solo unos 100 g y tienen una resolución de 640 x 512 píxeles. Siguen teniendo un volumen de unos 600 cm³ (Figura 11).



Figura 12: Imagen tomada por una cámara de imagen térmica montada en un dron; una persona acciona una válvula en una salida de gas. Debido a la expansión, el gas que se escapa aparece significativamente más frío (azul) que el entorno (verde) o el trabajador (amarillo a rojo).

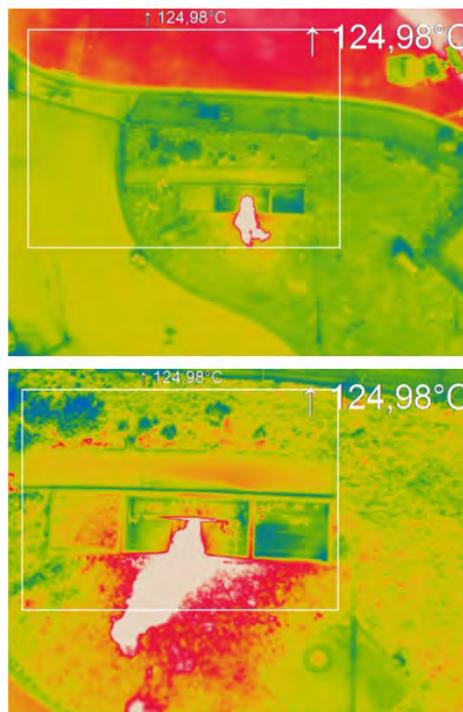


Figura 13: Defecto simulado en una planta técnica de gas con combustión de metano. A la izquierda: Etapa inicial grabada desde una altura de aproximadamente 50 metros; Derecha: A medida que el fuego progresa, el calentamiento de los alrededores es claramente visible, grabado desde aproximadamente 25 metros. Se utilizó una Optris PI Lightweight (Figura 11, derecha).

3.3.5 Cámaras LiDAR

La tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*, también LaDAR de *Laser Detection and Ranging*) se basa en el mismo principio de medición que la medición de distancia por emisor de radar. Casi todas las aplicaciones que se utilizan habitualmente con el radar también pueden obtenerse con pulsos láser. Un gran ámbito de aplicación es la investigación atmosférica. Sin embargo, LiDAR es conocido por el público en general porque está sustituyendo cada vez más a la medición de la velocidad en el tráfico. A diferencia de las cámaras termográficas, la tecnología láser no puede asignarse a un único rango de longitudes de onda. Según la aplicación, la longitud de onda del haz láser se sitúa en el rango ultravioleta, visible o infrarrojo del espectro. También son posibles los pulsos láser en el rango de los rayos X. Por ello, la tecnología láser tiende a definirse por otros aspectos. La intensidad extremadamente alta combinada con el agrupamiento compacto del haz y la frecuencia de refresco corta y exacta son criterios comunes.



Figura 14: Dron LiDAR de la Universidad de Innsbruck (<https://www.uibk.ac.at/new-sroom/die-vermessung-der-welt-per-drohne.html.de>).

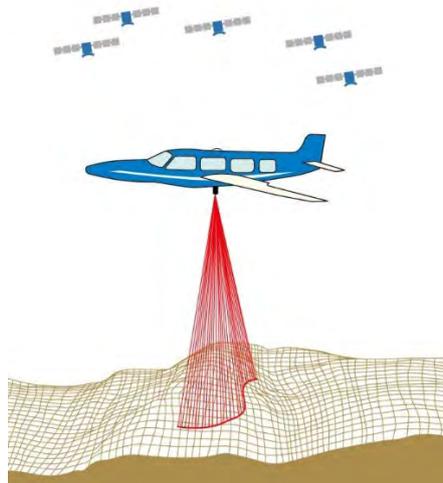


Figura 15: A la izquierda: Funcionamiento de Airborne Laserscanning con la ayuda de una aeronave y el apoyo de un posicionamiento por satélite de alta precisión; Derecha: Cartografía del terreno como producto derivado del modelo digital de elevación;

Fuente de la imagen: Geobasis.nrw (https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoehenmodelle/index.html).

En el presente trabajo, sin embargo, se describe la tecnología LiDAR para el llamado (airborne) Laserscanning. El escaneo láser define un proceso de escaneo de superficies como edificios, montículos o superficies en general con haz de láser con el fin de medirlas. Aquí se destacan dos aspectos: En primer lugar, se puede medir la duración del haz láser. A partir de ahí, se pueden calcular modelos de altura exactos si se conoce la altura del emisor. Por otro lado, como se describe en otros procesos, un haz láser también se absorbe, se refleja y se transmite. Así, la luz que vuelve al emisor tiene diferentes intensidades, de manera similar a las cámaras RGB. Guardado en el formato adecuado, el resultado se asemeja a una imagen en blanco y negro y, por tanto, puede utilizarse como técnica de imagen. La evaluación de estos datos se describe en Deutsch 2007 (30).

4 Campos de aplicación de los drones con sensores

Los campos de uso y aplicación de los drones son muy diversos en las industrias minera y energética, dependiendo de la elección del sensor (Tabla 1). Hay que tener en cuenta que, dada la diversidad, no hay un único sensor que pueda servir para todas las cuestiones.

Adicionalmente, los drones y los sensores utilizados pueden emplearse como componente *in situ* cuando se emplean métodos de observación terrestre de menor resolución espacial. Así, los sensores en drones pueden ser utilizados como paso intermedio en la aplicación de los datos satélite (entre otros, del programa Copernicus de la UE con los satélites Sentinel) y proporcionar así un conjunto de datos de mayor resolución. Al fusionar los conjuntos de datos, los datos obtenidos pueden ser refutados y/o verificados.

En septiembre de 2020 se aprobó una propuesta de investigación financiada por el BMBF para la THGA junto con los socios industriales asociados dentro del marco de financiación *Forschen für die zivile Sicherheit* (Investigación para la seguridad civil). En el proyecto *KavernenMonitoringSystem (KaMonSys)*, se va a crear un plan de vuelo 3D de alta precisión para la monitorización y detección de fugas de gas de un depósito de gas subterráneo con el fin de obtener más datos de entrada para observar la situación del edificio.

Además, existen varias aplicaciones comunes en las que los drones se utilizan para producir fotografías aéreas, para la fotogrametría y para determinar el volumen de, por ejemplo, montículos o canteras. Incluso con una cámara RGB simple es perfectamente factible la creación de una foto aérea y también de una foto aérea compuesta. Como ejemplo, se realizaron tomas de prueba en la reserva natural Amtsvenn, donde hay muchas cavernas almacén de gas, utilizando el mencionado Yuneec Mantis Q. A partir de 43 imágenes individuales, se registraron las zonas anegadas originadas en diferentes momentos junto a una cabeza de perforación (esquina inferior izquierda de la Figura 16). Los datos se procesaron con la herramienta de software abierto *OpenDroneMap* y se computaron en un mapa de localización. A pesar del equipamiento extremadamente barato del dron, el resultado es bueno y puede ayudar a documentar posiciones.

Tabla 1: Presentación a modo de ejemplo del uso y los campos de aplicación de los drones.

Grado de expansión	Aplicación	Sensor
1	Topografía de superficie y subterránea	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores ópticos para métodos fotogramétricos • Sensores LIDAR
2	Control de plantas e instalaciones técnicas de gas	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores ópticos para un fácil control visual e inspección de altura y vuelo interior • Sensores multiespectrales para el control de la corrosión • Sensores térmicos para la detección de fugas de gas
3	Vigilancia de escombreras, canteras, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores ópticos para inspecciones visuales simples o para métodos fotogramétricos. • Sensores multiespectrales para cartografiar los cambios en la vegetación como detección indirecta. • Sensores térmicos para la detección de puntos calientes/fríos • Sensores de radar para movimientos
4	Cambios volumétricos	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores ópticos para inspecciones visuales simples o para métodos fotogramétricos. • Sensores multiespectrales para cartografiar los cambios en la vegetación como detección indirecta. • Sensores de radar para movimientos
5	Prospección	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores multiespectrales para cartografiar los cambios en la vegetación como detección indirecta. • Sensores hiperespectrales para cartografiar menas, minerales y rocas.



Figura 16: Foto aérea tomada con una cámara de 13MP del Yuneec Mantis Q. La imagen se calculó a partir de 43 imágenes individuales con el software para formar una imagen compuesta y se superpuso a una Ortofoto digital del estudio topográfico de NRW (Renania del Norte). (Autor Dipl.-Ing. Benjamin Haske, Forschungszentrum Nachbergbau de THGA Bochum; Fuente de la imagen Ortofoto: Geobasis. NRW https://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dop).

De estos datos de imagen también pueden derivarse modelos 3D (Figura 17). Esto se debe a que, si las imágenes se crean desde diferentes perspectivas, las nubes de puntos pueden calcularse utilizando los puntos de unión reconocidos por el software para el cotejo de imágenes y los procedimientos de triangulación adecuados. La textura de las imágenes se superpone según los valores de color de las fotografías, lo que da lugar a modelos 3D simples (32).



Figura 17: Se puede crear un modelo de edificio en 3D mediante una nube de puntos generada a partir de 33 fotografías aéreas inclinadas. Los datos se obtuvieron con un DJI Mavic 2 Pro con una cámara Hasselblad de 20 MP. Las partes de la fachada de estructura uniforme, como la torre de escalera, solo pueden reproducirse de forma deficiente debido a la falta de puntos de enlace. (Autor: Ing. Benjamin Haske. THGA Bochum, Forschungszentrum Nachbergbau).

Con estas técnicas, las aplicaciones pueden llevarse a cabo directamente en el entorno de la actividad minera, como la extracción de materias primas cerca de la superficie en canteras. Sin interferir en las operaciones en curso, por ejemplo, se pueden utilizar modelos 3D para determinar el volumen extraído. Lo mismo ocurre con el volumen de las reservas o de las escombreras y montículos.

4.1 Categoría superior: Dron en operación subterránea

Basándonos en los sensores disponibles, las aplicaciones en minería se han diversificado. El mayor reto de todos ha resultado ser el proyecto UNDRROMEDA. El *Underground Robotic System for Monitoring, Evaluation and Detection Applications* está financiado dentro del marco de fomento del EIT *RawMaterials* y en él participa un consorcio mayor que incluye a DMT GmbH & Co.KG, entre otros. En un comunicado de prensa de la TU Freiberg (Universidad Técnica de Freiberg) (31), se describió el objetivo de UNDRROMEDA como la exploración y vigilancia de cavernas, túneles y canales subterráneos. El demostrador pretende enseñar que los drones que operan de forma autónoma también pueden ayudar en las operaciones subterráneas a penetrar en zonas peligrosas e inaccesibles, por ejemplo, con el fin de realizar mediciones donde el personal subterráneo corre demasiado riesgo. Se utiliza toda una serie de sensores para realizar la tarea. LiDAR y las técnicas de medición óptica en 3D deben proporcionar una imagen espacial y contribuir del mismo modo a evitar las colisiones. Esto se debe a que el principal reto que conoce un operador de dron es el vuelo en interiores, donde no existe ayuda del GNSS para el posicionamiento. El UAV debe entonces ser pilotado de forma completamente manual, lo que requiere una enorme coordinación ojo-mano por parte de un operador humano. En un sistema autónomo que vuela sin apoyo del GNSS, este debe ser proporcionado por otros sensores.



Figura 18: El dron del proyecto UNDRROMEDA está equipado con varios sensores y protegido por una jaula diseñada para amortiguar las colisiones con la roca circundante. Los vuelos de prueba en la mina de investigación y formación Reiche Zeche se muestran en un vídeo de YouTube (<https://youtu.be/1uk46ZkkejE>; Technische Universität Bergakademie de Freiberg (Universidad Técnica de Freiberg)).

5. Resumen

Dados los innumerables retos a los que se enfrentan los proyectos mineros hoy en día, es necesaria una gestión de riesgos innovadora, sólida y significativa. Los datos necesarios para ello los proporciona el geomonitoreo y, en particular, el uso de sensores montados en drones. Su diseño conceptual se desarrolla en base a los impactos medioambientales específicos. Se utilizan todos los sensores disponibles, cuyo uso puede consi-

derarse proporcional desde el punto de vista económico. El valor añadido de los conceptos de monitorización integrados reside en la fusión de datos de una amplia gama de sensores y su interpretación conjunta.

Además del rendimiento de los drones, hay que tener en cuenta la seguridad operativa. Sin un personal de operaciones experto y responsable, como el operador, el spotter (observador del espacio aéreo) y el analista de datos, los riesgos potenciales de las operaciones con drones pueden superar las oportunidades. Al mismo tiempo, la interpretación de los datos de las cámaras y, sobre todo, de los sensores, requiere conocimientos técnicos y experiencia sólidos. Sin conocimientos técnicos, el uso de drones de manera profesional carece de interés en muchos casos.

Existe un considerable potencial de innovación en la fusión de datos procedentes de diferentes sensores y de otras fuentes. Sobre esta base deben planificarse y aplicarse conceptos de monitorización significativos y sólidos. Si es necesario vigilar grandes áreas con una alta resolución temporal, se pueden utilizar sensores satelitales (33). En el marco de varios proyectos de investigación, el FZN ha investigado la utilidad de los datos de los sensores del programa europeo Copernicus. De hecho, los satélites Sentinel, que están operativos desde 2015, y los sensores que portan proporcionan información valiosa sobre los movimientos del terreno, la humedad del suelo, el estado de la vegetación, la cubierta vegetal y los cambios. Cuando se detectan aspectos relevantes para la minería, se pueden utilizar sensores aéreos, que garantizan una mayor resolución sobre el terreno en zonas de investigación más pequeñas. En este punto, aviones, helicópteros, globos o incluso drones pueden considerarse sistemas portadores. Su uso también puede combinarse de forma óptima con la inspección, el manejo y la comprobación visual de la variación detectada por parte de personal experto. Esto incluye también una estrecha colaboración entre expertos de multitud de disciplinas técnicas. Ante las grandes cantidades de datos que se generarán en el futuro gracias a la mejora de la tecnología de los sensores, así como la necesidad de superposición de conjuntos de datos espaciotemporales con diferentes resoluciones y el avance de la digitalización, los sistemas informáticos basados en la «inteligencia artificial», entre otras cosas, se convertirán en otra importante herramienta de análisis e interpretación de datos. En aras de la gestión de la calidad, la participación de expertos en la evaluación de los resultados también es indispensable.

Este aspecto también debe señalarse en la medida en que se trata de un proceso de adición de valor de los datos a la información general y al conocimiento. Así, los datos de geomonitoreo constituyen la base para una gestión de riesgos significativa. En cuanto al cumplimiento de la licencia social para operar (en inglés, *social license to operate*), lo esencial de la evaluación de probabilidad de riesgos debe comunicarse y discutirse con los *stakeholders*. En este sentido, los datos parciales del sensor de imagen de los drones ofrecen una oportunidad única. En vista del debate actual sobre la aceptación social de las empresas y de sus actuaciones, la creación de transparencia no debería ser una alternativa. Esta conclusión también la sugieren los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible para el mundo formulados por las Naciones Unidas hace unos años (*Seventeen Sustainable Development Goals*, 34).

Referencias

Nota: Las fuentes en línea se comprobaron por última vez el 09/10/2020.

- (1) Ernest & Young (EY) (2020): Top 10 business risks and opportunities – 2020. URL: https://www.ey.com/en_gl/mining-metals/10-business-risks-facing-mining-and-metals.
- (2) Georg Agricola: Vom Berg- und Hüttenwesen. 610 S., Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1977.
- (3) Museum of Drones. Search and Rescue vs. Search and Destroy. Frühe Entwicklungen. URL: <http://www.informatik.uni-oldenburg.de/~iug08/snd/geschichte1.html>.
- (4) Róża Sawczuk, Joanna Karpinska, Wojciech Milytyk (2019): What do we need to know about drone brood homogenate and what is known. Journal of Ethnopharmacology 245, article 111581. doi:10.1016/j.jep.2018.10.042.
- (5) Ben Zimmer: The Flight of 'Drone' From Bees to Planes. Wall Street Journal, 26. Juli 2013.
- (6) John F. Keane and Stephen S. Carr (2013): A Brief History of Early Unmanned Aircraft. Johns Hopkins APL Technical Digest 32(3): 558-571.
- (7) Unbemanntes Luftfahrzeug. Wikipedia. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Unbemanntes_Luftfahrzeug.
- (8) Quadrocopter. Wikipedia. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Quadrocopter>.
- (9) European Defense Agency. Remotely Piloted Aircraft Systems – RPAS (2020). URL: <https://www.eda.europa.eu/what-we-do/activities/activities-search/remotely-piloted-aircraft-systems---rpas>.
- (10) AltiGator. Unmanned Solutions. URL: <https://altigator.com/drone-uav-uas-rpa-or-rpas/>.
- (11) FLARM (2020): Power-FLARM UAV-Modul.- WebSite der FLARM Technology AG. URL: <https://flarm.com/de/losungen/losungen-fur-organisationen/losungen-fur-uav/>.
- (12) Deutsche Flugsicherung (2019): DFS Deutsche Flugsicherung und Deutsche Telekom gründen Gemeinschaftsunternehmen für den Drohnenmarkt. Pressemitteilung der DSF Deutsche Flugsicherung GmbH, Langern. URL: <https://kurzelinks.de/czvkc>.
- (13) Flightradar24 (2020): Screenshots der Flightradar24-Internetseite vom 05.10.2020. URL: <https://www.flightradar24.com/50.35,9.05/8>.
- (14) Brack, P. (1998): Hochgenaue Ortsbestimmung mit GPS/DGPS. Oberseminararbeit Geoinformatik, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin 11 S. URL: <https://www.grin.com/document/96240>.

- (15) GSA (2020): Galileo is the European global satellite-based navigation system. Galileo-Homepage der European Global Navigation Satellite System Agency (GSA). URL: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-european-global-satellite-based-navigation-system>.
- (16) Bünthe, O. (2020): Beidou-3: China vervollständigt GPS-Konkurrenten. Heise online. URL: <https://www.heise.de/news/Beidou-3-China-vervollstaendigt-GPS-Konkurrenten-4792326.html>.
- (17) Yuneec (2020): Mantis Q Datenblatt. URL: https://www.yuneec.com/de_DE/kameradrohnen/mantis-q/daten.html.
- (18) DJI (2020): Mavic 2 Technische Daten. URL: <https://www.dji.com/de/mavic-2/info#specs>.
- (19) MicaSense (2020): RedEdge MX - Beschreibung und Daten. URL: <https://micasense.com/rededge-mx/>.
- (20) Seager, S.; Turner, E.L.; Schafer, J.; Ford, E.B. (2005). "Vegetation's Red Edge: A Possible Spectroscopic Biosignature of Extraterrestrial Plants". *Astrobiology*. 5 (3): 372-390.
- (21) Parrot (2020): Parrot Sequoia - Support. URL: <https://support.parrot.com/de/support/produkte/parrot-bluegrass/sequoia>.
- (22) Görres-Grenzdörfer (2019): Multispektrale Fernerkundung mit Drohnen.- Vortrag zum 178. DVW-Seminar „UAV 2019 - Geodäten erobern den Luftraum“, Rostock. URL: [file:///L:/07_Sonstiges/Publikationen%20und%20Votr%C3%A4ge/Bergbau/Externe%20Publikationen%20\(Recherche\)/Session-4-2-Grenzdoerffer.pdf](file:///L:/07_Sonstiges/Publikationen%20und%20Votr%C3%A4ge/Bergbau/Externe%20Publikationen%20(Recherche)/Session-4-2-Grenzdoerffer.pdf).
- (23) National Institute of Standards and Technology (2020): NIST Chemistry WebBook. URL: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=Methane&Units=SI>.
- (24) BigGIS - Scalable GIS for Predictive and Prescriptive Analytics (2018): Optical Remote Sensing - Gas Cloud Detection. URL: <http://biggis-project.eu/biggis-docs/demos/optical-remote-sensing/>.
- (25) Fraunhofer IOS (ohne Jahresangabe): SpectralFinder - Materialien hyperspektral unterscheiden. URL: <https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/42878/> (Produkt-Faltblatt verfügbar unter: https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/68794/SpectralFinder_de.pdf?command=downloadContent&filename=SpectralFinder_de.pdf).
- (26) Universität Hedron (ohne Jahr): Poster "Electromagnetic Radiation Spectrum"; Online: <https://kurzelinks.de/u9xm>.
- (27) FLIR (2020): Radiometrische Wärmebildkamera für Drohnen - FLIR Vue Pro R. In: Unternehmens-WebSite der Firma FLIR Systems Inc.; Online: <https://kurzelinks.de/c9kp>.

- (28) OPTRIS (2020): Wie funktioniert eine Wärmebildkamera. In: Unternehmens-Web-site der Firma OPTRIS GmbH; Online: <https://kurzelinks.de/9jro>.
- (29) Workswell (2020): WIRIS Security für Sicherheits- und Suchanwendungen.- Unternehmens-WebSite der Firma Workswell s.r.o.; Online: <https://kurzelinks.de/Ophy>.
- (30) C. Teutsch (2007): Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from Optical 3D Laser Scanners. In Magdeburger Schriften zur Visualisierung; Band 1, Magdeburg, 166 S.
- (31) Rischer, L. (2018): Wie Drohnen die die Unterwelt erkunden. Pressemitteilung der TU Freiberg. URL: <https://tu-freiberg.de/presse/wie-drohnen-die-unterwelt-erkunden>.
- (32) PointCab GmbH (2014): Punktwolken von Drohnen auswerten – Anwendungsbericht Vermessung. Unternehmenswebsite. URL: <https://www.pointcab-software.com/punktwolken-von-drohnen-uav-unmanned-aerial-vehicle/>.
- (33) Mütterthies, A., Bernsdorf, B., Rudolph, T., Goerke-Mallet, P., Pakzad, K., Teuwsen, S. (2019): Detektion von Gasaustritten mit Methoden der Fernerkundung. Bergbau, Energie und Rohstoffe 2019, Bochum, S. 229-236.
- (34) Engagement Global gGmbH (Hrsg.) (2019): [Siebzehn] Ziele für nachhaltige Entwicklung. URL: <https://17ziele.de/> (visitado por última vez el 02/10/2020).

Publicado por primera vez en: Bergbau 72 (2021) Nr.1, S. 15-23.

Aumentar la aceptación social en la gestión de depósitos de residuos (GDR)

Tobias Rudolph, Peter Goerke-Mallet

Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Resumen

Asegurar la aceptación social para proyectos mineros, especialmente cuando se trata de instalar estanques para residuos mineros, supone un gran reto. El geomonitoreo moderno integra datos obtenidos mediante satélites en órbita, mediante aviones que sobrevuelan las zonas y mediante la observación de la parte superior e inferior de la superficie del suelo. Esto permite crear un proceso de comprensión transparente y referenciado en un espacio y tiempo determinados. La tecnología de la geomonitoreo constituye pues una herramienta importante para la gestión de riesgos y la comunicación durante el ciclo de vida de una mina.

1 Introducción

La minería implica la producción primaria y la extracción de recursos naturales, por lo que se sitúa al inicio de las cadenas de valor. Dado el crecimiento previsto de la población mundial de 7 700 millones de personas hasta alrededor de 10 000 millones de personas en 2050, puede asumirse que se dará un aumento similar en cuanto a la demanda de materias primas (1). No obstante, el progreso tecnológico y los cambios sociales probablemente cambiarán la constitución del conjunto de materias primas. Además, los consumidores alejándose más y más del ciclo de vida de las minas (Figura 1), y está menguando su nivel de conocimiento sobre los procesos técnicos y científicos al respecto.

Al mismo tiempo, la legislación y las organizaciones no gubernamentales que participan en el actual proceso de cambio social están repensando cómo abordar la protección del clima y del sistema de la Tierra (2), y a su vez muchas sociedades están promoviendo e introduciendo sistemas de economía circular. Todo esto está comenzando a eclipsar el proceso de extracción de materias primas, aunque este siga siendo tan importante como siempre (3, 4). También hay que tener en cuenta factores como digitalización en curso y la creciente entrada de medios de comunicación modernos, como las redes sociales, y la resultante aceleración de los procesos.



Figura 1: Representación del ciclo de vida de una mina.

La separación mental de la extracción de materias primas y el comportamiento del consumidor, y el creciente foco en la protección climática y medioambiental significan que nuestra sociedad solo tiende a ver hoy por hoy el impacto negativo que tiene la minería en las personas y el medioambiente, adoptando una respuesta basada en gran parte en sus emociones. Es, por tanto, difícil para las empresas mineras comunicarse en base a hechos y de forma efectiva y garantizar la transparencia de las decisiones operativas que deben tomar.

Otro problema que afecta a la comunicación y debate con el público es que, debido a la naturaleza finita de la explotación de un yacimiento, este no pueda vincularse de forma directa con el concepto de sostenibilidad. Mientras que esto puede tener éxito si se combina con una extracción lo suficientemente responsable del yacimiento y un proceso minero compatible con el medioambiente, en realidad vincular los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas con actividades mineras supone un reto operativo y comunicativo para las empresas mineras.

No obstante, una comunicación social abierta y transparente es imprescindible para la aceptación de una industria minera con un modo de operar basado en su localización y a largo plazo y una demanda significativa de todo tipo de trabajadores cualificados. Para que esto se produzca, los operadores de explotaciones mineras necesitan tener en cuenta y reaccionar ante cambios económicos, ecológicos y sociales. Este tipo de estrategia se adoptó también en el *Science Policy Report* (informe sobre política científica en español) de la Academia Brasileña de Ciencias y la Academia Nacional de Ciencias Alemana (conocida como Leopoldina) y otros socios, que ante los recientes accidentes (particularmente en depósitos de residuos mineros, como el desastre de la presa de Brumandinho en Brasil en 2019) demandan un cambio de paradigma colectivo por parte de la legislación, las empresas mineras, las comunidades científicas y el público (5).

2 LSO - La licencia social para operar

El término *licencia social para operar* está relacionado con la nueva concienciación social sobre la industria minera. Este concepto, desarrollado hace alrededor de 20 años como parte del debate sobre la sostenibilidad, refleja la reputación de una empresa y su aceptación social. Todavía tiene que definirse desde una perspectiva interna y externa.

De hecho, Georg Agricola escribió sobre la responsabilidad social de los operadores de la industria hace cientos de años en su trabajo de referencia sobre la industria minera y metalúrgica *De re metallica* (6). En su primer libro *Vom berg- und hüttenmännischen Beruf und seinem Nutzen* (en español literalmente «La profesión minera y metalúrgica y sus usos»), Agricola examinaba argumentos de la parte crítica de la opinión pública. Su análisis del daño causado por la minería al medioambiente y los beneficios que las actividades mineras traerían a la sociedad puede verse como los inicios de la teoría de la gestión de riesgos.

Para una empresa minera, la responsabilidad del operador desde un punto de vista interno recoge la licencia para operar técnica y legal que cubre todo el ciclo de vida minero. La empresa adquiere esta licencia tras pasar un proceso de aprobaciones, estudios de impacto medioambiental, planes de geomonitoreo y sistemas de gestión de riesgos.

Desde un punto de vista corporativo, asegurar y reforzar la responsabilidad del operador crea un entorno positivo en el que pueden ponerse a buen uso la estrategia de la empresa y su valor añadido neto (7). Las empresas con aceptación social suelen tener éxito a la hora de alcanzar sus objetivos sostenibles. Asimismo, son capaces de afrontar activamente las consecuencias económicas, ecológicas y sociales derivadas de sus operaciones comerciales y de tratar proactivamente la credibilidad de su negocio (8).

Desde la perspectiva externa del público y *stakeholders*, todo depende de la licencia social para operar. Su percepción se caracteriza por varios aspectos, como la fiabilidad, los valores, la confianza, la comunicación, la creación de redes, la transparencia y el desarrollo de conocimiento y comprensión.

En términos de sostenibilidad y la preservación de las condiciones de vida naturales, y en el contexto de fuerzas, estilos y valores, estas dos perspectivas sobre el concepto de responsabilidad del operador pueden representarse en dos procesos fundamentales para la industria minera (Figura 2) (2):

- Proceso 1 (línea de puntos roja de la Figura 2): desde un punto de vista histórico, el objetivo del estilo de minería tradicional y simple consistía en paliar problemas existenciales y preservar la base de la vida.
- Proceso 2 (línea de guiones negros de la Figura 2): en un futuro desarrollo de un ciclo de vida minero dominado por la industria, todo se basará en una posición de poder y las acciones corporativas planificadas de las empresas mineras, que se mostrarán siguiendo las características particulares de la industria minera (como los factores de la localización, la historia de la empresa y la estrategia corporativa).

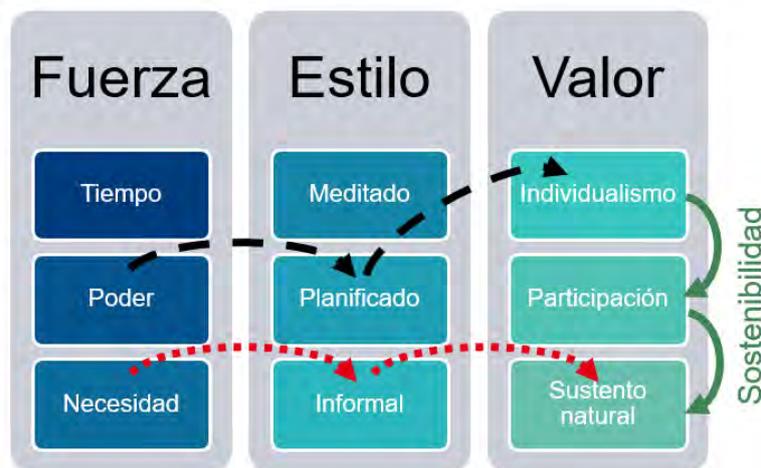


Figura 2: Representación esquemática de las principales interacciones que afectan a los procesos mineros en cuanto a las fuerzas, los estilos y los valores relevantes para la sostenibilidad (de acuerdo con 2, editao).

Solo con la incorporación de conceptos modernos que hay por debajo de la licencia social para operar podemos ver la involucración real de las partes afectadas. Esto conlleva una mejora de las condiciones de vida naturales y una mayor sostenibilidad social (línea verde de la Figura 2).

Las cuestiones que rodean la aceptación social de las empresas mineras se basan en la suposición de que el público general (por ejemplo, residentes locales) y los *stakeholders* que rodean la actividad minera se están incluyendo más y más en la toma de decisiones que les impactan de forma directa (9). Las iniciativas voluntarias de los operadores mineros más allá de sus responsabilidades estatutarias son un elemento clave para alcanzar la aceptación social. A pesar de la elevada concienciación sobre la aceptación social dentro de las empresas mineras, todavía no hay consenso sobre los medios a desplegar y su efectividad (9). El éxito del impulso de la aceptación social depende así principalmente del desarrollo y mantenimiento de relaciones sostenibles con los *stakeholders* o, en otras palabras, de tomar un enfoque participativo. Esta táctica representa, de esta manera, un elemento central del proceso de comunicación.

La licencia social para operar comprende la integración de la empresa en las estructuras que la rodean (10). Una herramienta o un proceso de gestión habrá evolucionado a partir de esto para dirigirse principalmente a los *stakeholders* y las estructuras sociopolíticas. Toda empresa que tenga un impacto en cuestiones sociales con un factor humano o medioambiental en su entorno local, y consecuentemente bajo observación, requiere de este tipo de estrategia. Estos nuevos planes de negocio, respaldados tal y como están ya por la digitalización y los métodos de la Industria 4.0, posibilitan nuevas culturas corporativas. Esto implica una amplia transparencia, un acceso casi ilimitado a la información y una cooperación entre empresas de forma que pueda implementarse de arriba abajo y de abajo a arriba dentro de la estructura del grupo (11).

El debate en curso sobre la aceptación social de las empresas y sus acciones también se está llevando a cabo desde una perspectiva sostenible (12). Incluso la Organización de las Naciones Unidas, con sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) ha intensificado y ampliado el debate sobre la gestión sostenible de procesos operativos (13). La ética económica ha significado que los operadores de explotaciones mineras también deban ahora hacer frente a estos objetivos e iniciar un diálogo con el público, los individuos y los *stakeholders* relevantes (1, 14).

Los procesos mineros, como la construcción y la operativa de plantas de preparación de minerales y estanques de residuos, constituyen una intrusión en el paisaje y el entorno natural, y suelen causar cambios irreversibles. En este contexto, la Sociedad Geológica de Londres, en su interpretación geocientífica de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, ha determinado los siguientes objetivos para la industria minera y para depósitos de residuos (15):

- 1 Fin de la pobreza
- 2 Hambre cero
- 7 Energía asequible y no contaminante
- 8 Trabajo decente y crecimiento económico
- 11 Ciudades y comunidades sostenibles
- 12 Producción y consumo responsables
- 13 Acción por el clima

A partir de esto, tal y como se ha mencionado, la minería no puede ser una operación sostenible estrictamente hablando por la naturaleza finita de cualquier yacimiento natural, viéndose un conflicto de objetivos respecto al ODS 12. Este conflicto no puede resolverse a nivel abstracto mientras se mantenga el contexto de los objetivos sostenibles, como en el caso de las 12 metas de la ONU. La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) de actividades mineras y el factor sostenible pueden tenerse en cuenta al principio del proceso de aprobación, por ejemplo (Figura 3) (16). Aquí los factores importantes serían el cumplimiento de estándares en cuanto a procesos operativos, importantes para la seguridad y de comunicación, el continuo análisis del impacto de las operaciones de extracción de materias primas y la limitación de los efectos negativos. Además, debe establecerse un proceso de participación regional para que la población local pueda participar en términos de información y coste (5). Aquí pueden darse nuevas oportunidades en forma de herramientas de geomonitoreo.

En relación con esto, Pateiro Fernández habla de adoptar un enfoque basado en la ubicación para desarrollar el paradigma sostenible, por lo que quiere decir la reacción específica a las condiciones marco existentes (17). El objetivo sería minimizar el impacto negativo en la sociedad y el entorno mientras que se maximizarían factores sociales y económicos. El proceso de participación (una parte integral del concepto de sostenibilidad) servirá así para aumentar el nivel de aceptación social de medidas relacionadas con la minería.

3 Geomonitorreo

El geomonitorreo es una herramienta científica y tecnológica de valor para seguir el ciclo de vida de una instalación minera. Para alcanzar el nivel de aceptación social del que se ha ido hablando y cumplir los criterios para reducir riesgos, es importante desarrollar y poner en marcha un régimen de geomonitorreo continuo de las actividades mineras (Figura 3). Se puede adoptar un amplio abanico de diferentes métodos a este respecto según las cuestiones a tratar (Figura 4). Los resultados de las operaciones de geomonitorreo deberían tratarse y evaluarse íntegramente (8).

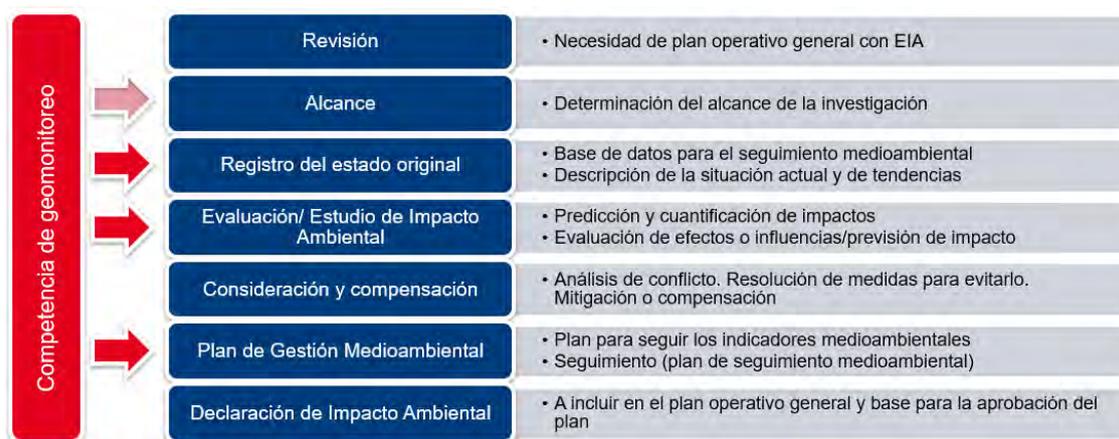


Figura 3: Fases del proceso de la evaluación de impacto ambiental mostrando las fases del geomonitorreo (implicación directa = flecha roja; implicación indirecta flecha roja difuminada).

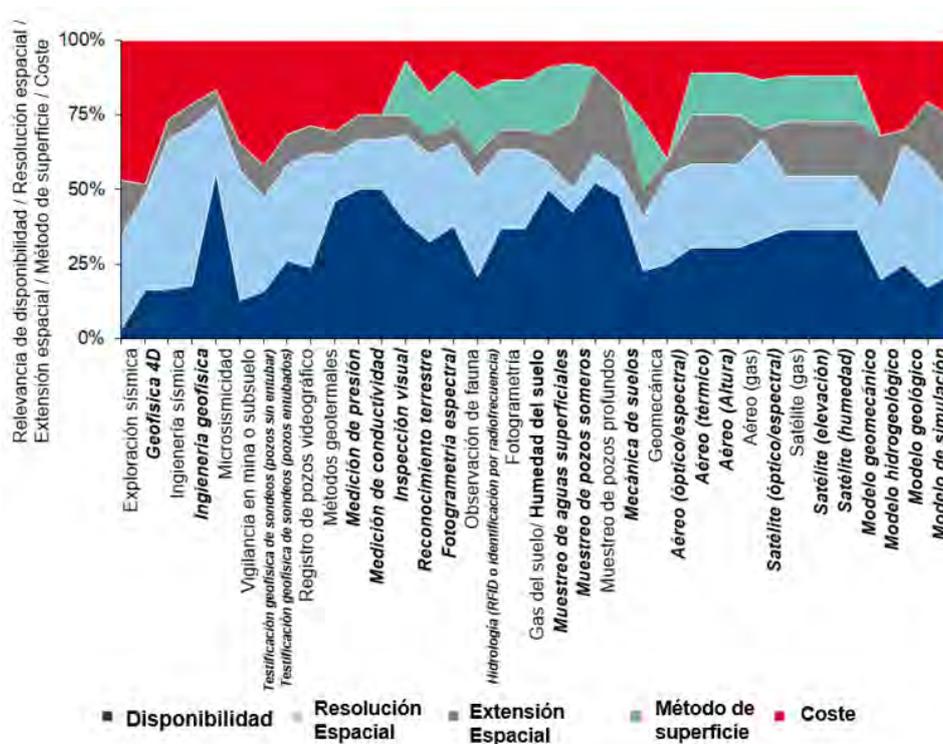


Figura 4: Representación del ámbito y la complejidad de herramientas de geomonitorreo actuales (en negrita = herramientas de geomonitorreo para GDR).

Al llevar a cabo actividades de geomonitoreo en depósitos de residuos no basta con basarse en datos de satélites de observación de la Tierra como el Sentinel-1, cuya misión forma parte del programa Copérnico de la UE para mapear movimientos del suelo. Hay que usar, además de esto, otros métodos, como visitas sobre el terreno, inspecciones o la instalación de sensores *in situ* (en negrita, Figura 4).

Al tratarse cuestiones relevantes en términos de seguridad (de aquellas que tienden a surgir por lo general durante el ciclo de vida de una mina), resulta crucial la gestión de riesgos. Con el fin de poder realizar una evaluación responsable de los riesgos derivados de operaciones de depósitos de residuos y hacer los ajustes apropiados al régimen de funcionamiento, resulta clave contar, en la medida de lo posible, con (geo)datos, información y sistemas de gestión de conocimientos con un sistema de referencia 4D. Esto se relaciona de forma directa con el geomonitoreo de toda la mina y su entorno (19).

Los resultados de un proyecto de investigación para detectar movimientos del terreno en entornos urbanos y no urbanos pueden servir también para dar soporte en la operativa de depósitos de residuos (Figura 5). En este caso, la teledetección por radar, utilizada para la detección de movimiento de tierra, se alimenta de un amplio despliegue de información espaciotemporal adicional con el fin de identificar cualquier movimiento de suelo filtrado. Esta operación digital, controlada y supervisada por personal experto, permite reducir las medidas de geomonitoreo a nivel de eventos, con todas sus visitas e inspecciones periódicas. Al mismo tiempo, la integración completa de *datasets* 4D adicionales (como datos meteorológicos) (fases 4 y 5 de Figura 5) en el análisis de series temporales de los datos del radar significa que se podrán identificar todos los cambios en una etapa temprana para que se puedan implementar contramedidas y salvaguardias a tiempo. Esto puede ayudar a evitar o reducir futuros daños de forma potencial.

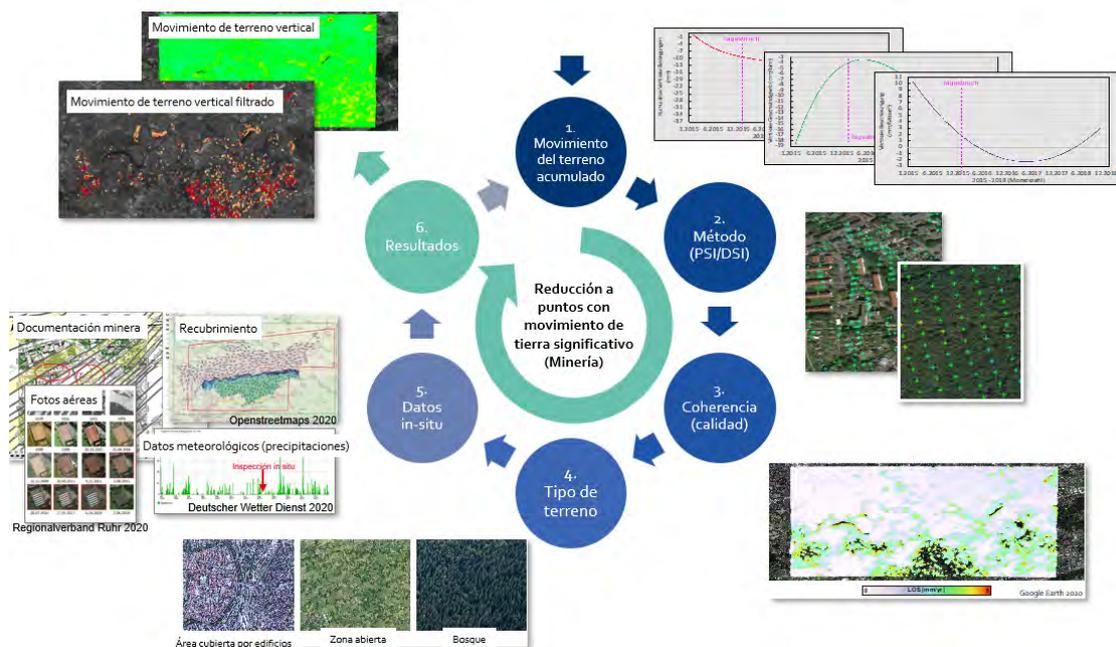


Figura 5: Aplicación de teledetección por radar orientada a soluciones incorporando información adicional para detectar movimientos del suelo a pequeña escala (proyecto de investigación para la cuenca del Ruhr).

De este modo, cualquier problema que pudiera impactar la integridad del sitio podría reconocerse rápidamente y promoverse el entendimiento de las interrelaciones científicas y técnicas, un entendimiento que también se validaría mediante observación y mediciones. La empresa minera podrá usar entonces el conocimiento de este proceso para comunicación interna y externa, de forma que pueda tenerse en cuenta desde el principio al público y los *stakeholders* relevantes en las consideraciones relativas a la planificación (21). Mientras que un enfoque holístico podría inicialmente mantener la gestión del proyecto y el trabajo de comunicación externa, con el tiempo este promoverá una aceptación más resiliente y sostenida del proyecto minero. La aceptación social de proyectos mineros sostenibles.

4 Interpretación

Todo proceso minero solo podrá entenderse como sostenible de forma justificada cuando los yacimientos en cuestión se exploten siguiendo los objetivos sostenibles oportunos. El geomonitoreo tiene en cuenta de forma general estos objetivos sostenibles y limita a su vez el impacto medioambiental del proceso de extracción (Figura 6). Al contemplar la integración digital total de todos los métodos disponibles, siendo estos aéreos (como satélites, sobrevoladores o drones), terrestres (como visitas locales o sensores *in-situ*) y del subsuelo (como geofísica de perforación y medidas de topografía minera), se podrá dar un proceso transparente que tendrá en cuenta eventos significativos en el espacio y el tiempo. Esta comprensión del proceso constituye la base para la comunicación y, por ende, para el desarrollo de la licencia social para operar.



Figura 6: Geomonitoreo como base para la comunicación y la licencia social para operar.

La aceptación social de proyectos mineros sostenibles debe cubrir todo el ciclo de vida de la instalación minera, desde la planificación conceptual inicial, pasando por la fase de cierre, debiendo tener, además, en cuenta los aspectos económicos, ecológicos y social-

les de toda la operativa. Un desarrollo así podrá solo entonces considerarse sostenible, al tener una actividad basada en hechos y ser lo suficientemente transparente gracias a su comunicación con todas las partes implicadas. Dados los parámetros físicos y cronológicos específicos del proceso minero y su operativa dinámica, la necesidad de mantener su credibilidad y fiabilidad ante los ojos del público en todo momento constituye un gran reto para los operadores mineros. Un régimen de geomonitoreo continuo puede convertirse en una respuesta efectiva ante este problema (Figura 7).

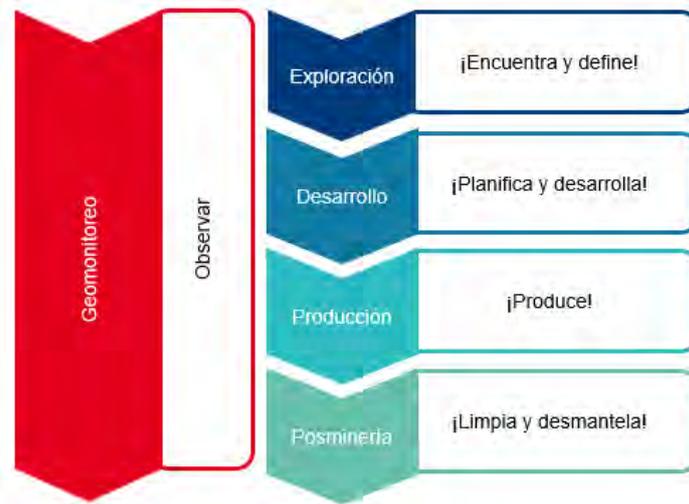


Figura 7: Geomonitoreo como parte del ciclo de vida minero.

5 Conclusiones

Los varios esfuerzos asociados a la licencia social para operar tienen un rol protagonista en el ciclo de vida minero, y este tipo de actividades están bastante en el foco público. Al mismo tiempo, los desarrollos tecnológicos actuales de nuestra sociedad (incluidos la digitalización y el rápido uso general y difusión de las redes sociales), así como la transición a una economía circular, han traído consigo un cambio de actitud que ha visto el declive de la aceptación y el conocimiento de la industria minera. Esto se relaciona en general con una agudizada necesidad de información. A fin de minimizar la pérdida gradual de la aceptación e, incluso, empezar a revertir este proceso, debe prestarse una mayor atención para hacer que el proceso de toma de decisiones sea más abierto y participativo a través de la introducción (cuando sea posible) de un sistema de gestión de proyectos transparente y un amplio conjunto de medidas integrales de geomonitoreo, así como proyectos de comunicación externa orientada a *targets* determinados. Las varias herramientas técnicas de geomonitoreo ahora disponibles podrán dar al público una percepción real de los trabajos de la industria minera y las operaciones que se llevan a cabo en esta. Yendo más allá, los métodos de gestión de riesgos implican que podrán identificarse cambios de forma temprana para que puedan implementarse contramedidas y salvaguardas a tiempo. Incorporar un régimen de geomonitoreo directamente al ciclo de vida minero es, por tanto, la clave para activar la licencia social para operar requerida por aquellos responsables de la gestión de depósitos de residuos.

Reconocimiento

Los autores quieren dar las gracias a todos los revisores del artículo, especialmente Katrin Brummermann, por sus valiosos comentarios y *feedback*.

Referencias

- (1) Wellmer, F.-W. (2020): Bergbau - Energie - Geologie, Nachhaltigkeit und Rohstoffgewinnung - ein Widerspruch?. *Bergbau* 6:2020: 10 S., 13 Abb., 4 Tab.
- (2) Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2016): Der Umzug der Menschheit - Die transformative Kraft der Städte. Zusammenfassung. - 43 S., 2 Abb., 7 Tab.; Berlin: WBGU.
- (3) Hiebel, M.; Bertling, J.; Nühlen, J.; Pflaum, H.; Somborn-Schulz, A.; Franke, M.; Reh, K.; Kroop, S.: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.) (2017): Studie zur Circular Economy im Hinblick auf die chemische Industrie. Studie im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V., Landesverband NRW; 178 pp., 46 fig., 14 tables.; Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT. - URN: urn:nbn:de:001 I-n-4769003.
- (4) Müller, F.; Kohlmeyer, R.; Krüger, F.; Kosmol, J.; Krause, S.; Dorer, C.; Röhreich, M. (2020): Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft. 34 pp., 1 fig.; Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- (5) Apaéstegui Campos, J.; Brandão, L.; Camargo de Azevedo, A.; Casanova, M.; Cord, A.; Gerner, N.; Giese, E. C.; Händel, F.; Jager, N.; Jessen, G. L.; Lepenies, R.; Maia Barbosa, P.; Marchezini, V.; Pujoni, D.; Salma, A.; Santas Sánchez, A.; Schierz, A.; Stemke, M.; Ussath, M.; Val, P.; Whaley-Martin, K.; Yoshie Yamamoto, F.; Zorzal-Almeida, S. (2019): A new vision of sustainable management in mining and post-mining landscapes. 30 pp., 6 fig.; Halle (Saale) u. a.: Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V., Nationale Akademie der Wissenschaften u. a. (Science Policy Report, October 2019).
- (6) Agricola, G. (1556): *De re metallica* - Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen. Nachdruck der Erstausgabe, 2006, 564 pp., VDI-Verlag, Wiesbaden.
- (7) Lin-Hi, N. (2018): Licence to operate. In: *Gabler Wirtschaftslexikon*. Revision von Licence to operate vom 19.02.2018 - 15:10. Online: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/licence-operate-51612/version-274773> (visitado por última vez el 04/06/2020).
- (8) Löhr, A. (2003): Interview: „Noch sind es nicht viele Firmen“. *Spektrum der Wissenschaft*, 2003(12): 94. Online: <https://www.spektrum.de/magazin/interview-noch-sind-es-nicht-viele-firmen/830326> (visitado por última vez el 04/06/2020).

- (9) Nelsen J. L. (2007): Social license to operate: integration into mine planning and development. 127 pp., 21 fig., 5 tables; Master thesis, Vancouver, BC, University of British Columbia. Online: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0081173> (visitado por última vez el 26/06/2020).
- (10) Black, L. (2013): The social license to operate – your management framework for complex times. 100 pp.; Oxford: DoSustainability (DöShorts series).
- (11) DGMK-Veranstaltung / Aufsuchung und Gewinnung vom 28.05.2020; DGMKWebinar: Digital Transformation - The people component. Online: <https://dgmk.de/veranstaltungen/dgmk-webinar-digital-transformation-the-people-component/> (visitado por última vez el 15/05/2020).
- (12) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2017): Nachhaltige Entwicklung als Handlungsauftrag. Stand: 16.08.2017. Online: <https://www.bmu.de/theroen/nachhaltigkeit-internationales/nachhaltige-entwicklung/strategie-und-umsetzung/nachhaltigkeit-als-handlungsauftrag/> (visitado por última vez el 03/06/2020).
- (13) Engagement Global gGmbH (Hrsg.) (2019): [Siebzehn] Ziele für nachhaltige Entwicklung. Online: <https://17ziele.de/> (visitado por última vez el 04/06/2020).
- (14) Kleiner, M. (2016): Die Bedeutung von Stakeholder-Dialogen aus Sicht der Interaktionsökonomik – illustriert am Beispiel eines Bergbau-Unternehmens. VIII + 184 pp., 31 fig.; Leipzig: HHL Leipzig Graduate School of Management. Zugl.: Diss., HHL Leipzig Graduate School of Management. Online: <https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A7816/attachment/ATT-0/> (visitado por última vez el 04/06/2020).
- (15) Geological Society (2021): Geoscience for the Future- Sustainable Development Goals. Online: <https://www.geolsoc.org.uk/~media/shared/documents/education%20and%20careers/Resouces/Posters/geoscience%20for%20the%20future%20GERMAN.pdf?la=en> (visitado por última vez el 20/05/2021).
- (16) Goerke-Mallet, P. (1999): Aufstellung eines Rahmenbetriebsplanes mit Umweltverträglichkeitsuntersuchung - eine Herausforderung an das Kommunikations- und Informationsmanagement. Das Markscheidewesen in der Rohstoff-, Energie- und Entsorgungswirtschaft, 42(18).
- (17) Pateiro Fernandez, J.B. (2008): Nachhaltigkeit im Bergbau. Indikatoren und Beurteilungssystem. 263 pp., 5 fig., 95 tables; Diss., RWTH Aachen. Online; <https://d-nb.info/990723992/34> (visitado por última vez el 26/06/2020).
- (18) Rudolph, T.; Goerke-Mallet, P.; Melchers, C. (2020): Geomonitoring im Alt- und Nachbergbau. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 145(3): 168-173, 5 fig.
- (19) Goerke-Mallet, P.; Brune, J.; Mollerherm, S.; Kretschmann, J.; Rudolph, T.; Mütterthies, A. (2020): Post mining analytics from space: an innovative approach to improve risk-management in mining. SME Annual Meeting, 23-26 Feb. 2020, Phoenix, AZ, Preprint 20-020, 3 pp.

- (20) Rudolph, T.; Goerke-Mallet, P.; Janzen, A.; Mütterthies, A.; Pakzad, K.; Spreckels, V.; Teuwsen, S.; Vehling, L.; Yang, C.-H. (2020): Bergbaumonitoring im südlichen Ruhrgebiet. In: Tagungsband Geomonitoring 2020, pp. 163-177. DOI: <https://doi.org/10.15488/9348>.
- (21) Lerch, F. (2020): Erfolgreicher Realisierungsdialog für E&P-Projekte - ein Beispiel. Erdöl Erdgas Kohle, 136(6): 21-23, 2 fig.

Publicado por primera vez en: GeoResources Journal 7 (2021) No.3, pp. 43-48.

Capítulo 4 - Licencia internacional

Analítica posminera desde el espacio: un enfoque innovador para mejorar la gestión de riesgos en la minería

Peter Goerke-Mallet¹, Jürgen Brune², Stefan Möllerherm¹, Jürgen Kretschmann³, Tobias Rudolph¹, Andreas Mütterthies⁴

¹Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania; ²Colorado School of Mines, Golden, Colorado, EE UU; ³Presidente de la Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania; ⁴EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster, Alemania

Resumen

La actividad minera ha ido recibiendo más y más atención por parte los políticos, las autoridades y el público. Esto ha sido motivado por el debate climático y medioambiental. Las cuestiones sociales, medioambientales y políticas, y la aceptación de la minería se están volviendo más y más difíciles, a pesar de la demanda en aumento de minerales y materias primas. En Alemania, la extracción de carbón bituminoso ha parado y se ha programado que la minería de lignito se elimine gradualmente para 2038. Las desastrosas rupturas de presas de residuos han llamado la atención de todo el mundo. La opinión pública sobre la minería y de la extracción de minerales en Estados Unidos son muy similares. Aun así, los materiales críticos requieren de una minería y de un procesamiento para minerales específicos, para lo que resulta esencial un desarrollo responsable de recursos naturales. De esta forma, en el ciclo de vida de la mina actual, la gestión de riesgos se convierte en una parte fundamental del proceso minero.

Este artículo describe métodos innovadores para supervisar impactos medioambientales de la actividad minera. Estos incluyen sistemas de sensores de alerta temprana para la gestión de riesgos mineros durante el ciclo de vida de la mina y la fase tras el cierre de la mina. Se habla sobre cómo los ingenieros mineros utilizan el *big data* a partir de la observación de la Tierra y las tecnologías digitales para mitigar los impactos medioambientales y generar un valor sostenible.

1 Introducción

Desde hace un tiempo, las actividades mineras se han ido volviendo un foco del debate público por sus impactos sociales y medioambientales. Esta cuestión se ve alimentado por el debate sobre el cambio climático, el endurecimiento de la regulación medioambiental y una actitud del público de *not in my backyard*. La sociedad en general no es consciente de la importancia de los productos o mercancías obtenidos a través de la actividad minera. Esto lleva siendo un reto histórico a nivel de comunicación para la industria minera porque las personas no son conscientes de que se necesita una gran

cantidad de productos obtenidos a partir de minas para construir casas, carreteras, puentes, coches, neveras y teléfonos. Por el contrario, las personas vinculan la actividad minera más fácilmente con las necesidades de productos petrolíferos mientras llenan el depósito de sus coches.

En las últimas cinco décadas, la aceptación pública de la minería se ha ido deteriorando constantemente en Alemania. La extracción subterránea de carbón bituminoso se detuvo en 2018, lo que demandó que los servicios públicos dependieran únicamente de carbón importado. Una comisión de *stakeholders* de alto nivel ha recomendado ir eliminando poco a poco la producción de lignito y la producción de electricidad para 2038. El accidente de 2010 de la planta nuclear de Fukushima en Japón dio pie a que el gobierno de Alemania comenzase a retirar también gradualmente la generación de energía nuclear. La extracción de petróleo y gas y el almacenamiento estratégico en cavernas también han sido también objeto de críticas ante los riesgos de terremotos. Las desastrosas rupturas de presas de residuos y su impacto en las vidas humanas y en el medioambiente han atraído la atención de todo el mundo y perjudicado la opinión pública sobre la industria minera.

La industria minera actual debe volverse bastante más consciente sobre sus impactos sociales y medioambientales. Los riesgos del negocio minero no son ya únicamente financieros, sino que afectan a la reputación pública y la licencia social para operar. Estos riesgos deben gestionarse durante todo el ciclo de vida de la mina dentro de un proceso más amplio que el que se requería hasta ahora. El control continuo, el procesamiento y analítica de datos y el uso de tecnologías de comunicación avanzadas son elementos fundamentales en este contexto. Planificar las actividades y los procesos mineros, asegurar la aprobación tanto de las autoridades como de la sociedad, construir, operar y cerrar minas requiere de un control medioambiental continuo. Todo el ciclo de vida de la mina debe supervisarse, registrarse y comunicarse a los *stakeholders*. El desarrollo de sistemas de sensores de alerta temprana junto con plataformas de información innovadoras son una manera de respaldar el proceso de gestión de riesgos mineros de cara al futuro, desde la exploración hasta la extracción y durante la fase «posminera¹».

2 El ciclo de vida de la mina

Los procesos mineros son objeto de un ciclo de vida que comienza con la concesión de derechos y licencias o permisos para la actividad minera, lo que va seguido de las fases de exploración y producción. Cuando las reservas de mineral se agotan, comienzan las fases de cierre y la posterior etapa posminera. Las estructuras mineras se desmantelan, y los terrenos se recuperan para su uso futuro. Las actividades posmineras se llevan a cabo durante años o décadas y, en algunos casos, continúan permanentemente (Mel-

¹ N. de T.: Se utilizan los términos *posminero*, *posminería* y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por *posminería* para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la *t* y el guion tras el prefijo *pos* por no ir seguido de *s*). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

chers & Goerke-Mallet, 2015). Un ejemplo de cuidado permanente sería el tratamiento del agua.

La figura 1 ilustra los retos medioambientales polifacéticos/las varias facetas de los retos medioambientales de la posminería en la cuenca del Ruhr (de carbón) de Alemania. La actividad minera ha impactado el agua, el suelo y el aire: el drenaje del agua de mina afecta la hidroquímica de las aguas receptoras. Las labores mineras en pozos y cerca de la superficie están sujetos a hundimientos y pueden causar agujeros y hundimientos en la superficie. Las tierras afectadas y residuos acumulados deberían también recuperarse para prevenir la contaminación del aire y el polvo.

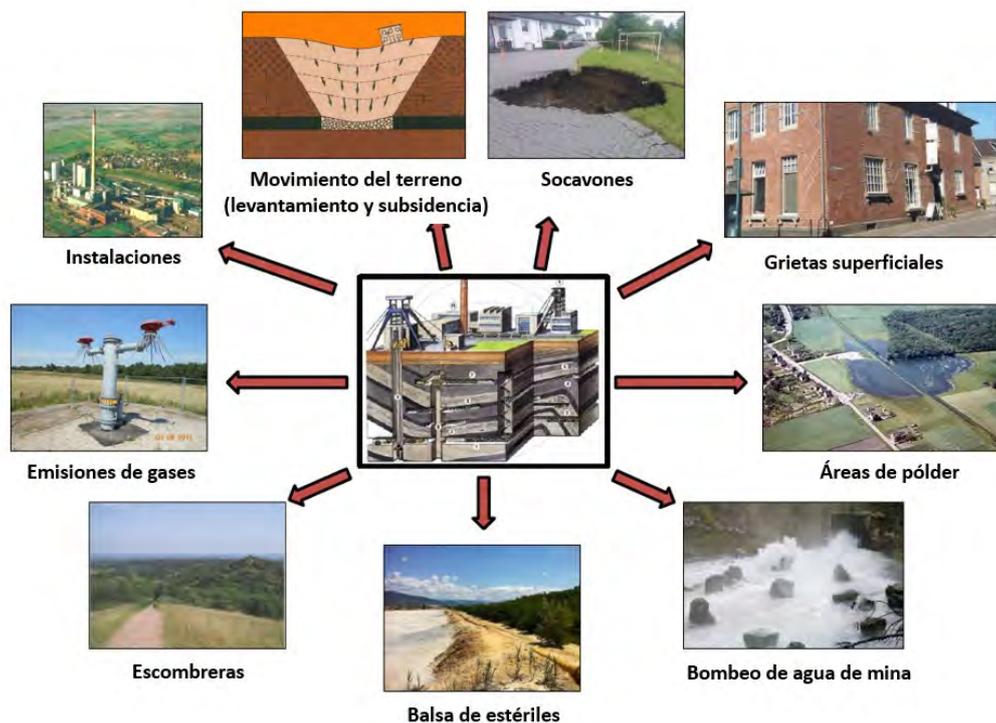


Figura 1: Algunas actividades posmineras en el Ruhr (Alemania) tras el cierre de minas de carbón subterráneas (Sentido de las agujas del reloj desde abajo a la izquierda: 1.) THGA, 2.) THGA, 3.) Boese & Farrenkopf 2014, 4.) Kratzsch 2013, 5.) DMT, 6.) Baglikow 2012, 7.) EGLV, 8.) City of Bochum, 9.) EFTAS, 10.) GvSt).

Los impactos negativos de la actividad minera pueden convertirse en factores de coste significativos (no únicamente a nivel de balance contable, sino particularmente a nivel de aceptación social). La pérdida de la licencia social para operar es un riesgo del que se pueden recuperar pocas empresas. Este es uno de los aspectos más importantes del cierre de minas y de la posminería por los que las empresas mineras deben enfrentarse a las comunidades. Una recuperación y unas operaciones de cierre mal ejecutadas e insostenibles hacen que la aceptación social de la actividad minera sea imposible y puede destruir la reputación de esta industria durante generaciones. La sistemática gestión de riesgos medioambientales y sociales y la comunicación con el público constituyen la base para una gestión de actividades mineras responsable y sostenible.

Las leyes y regulaciones alemanas definen claramente las responsabilidades de las empresas mineras durante las fases de cierre de la mina y posteriores a esta. Ahora otros países se están volviendo más conscientes sobre la necesidad de organizar y gestionar de forma adecuada su legado minero (Melchers & Goerke-Mallet, 2016).

3 Procesos de gestión de riesgos mineros

Se puede crear una base para una gestión de la actividad minera responsable y sostenible identificando, evaluando y gestionando riesgos de forma sistemática. En la figura 2 se muestran algunos de los mayores riesgos de las operaciones posmineras, su probabilidad y sus consecuencias económicas. Muchos de estos riesgos están dentro de las categorías de «alta probabilidad, consecuencias graves» de la matriz de riesgos, así que su mitigación tiene una prioridad alta.

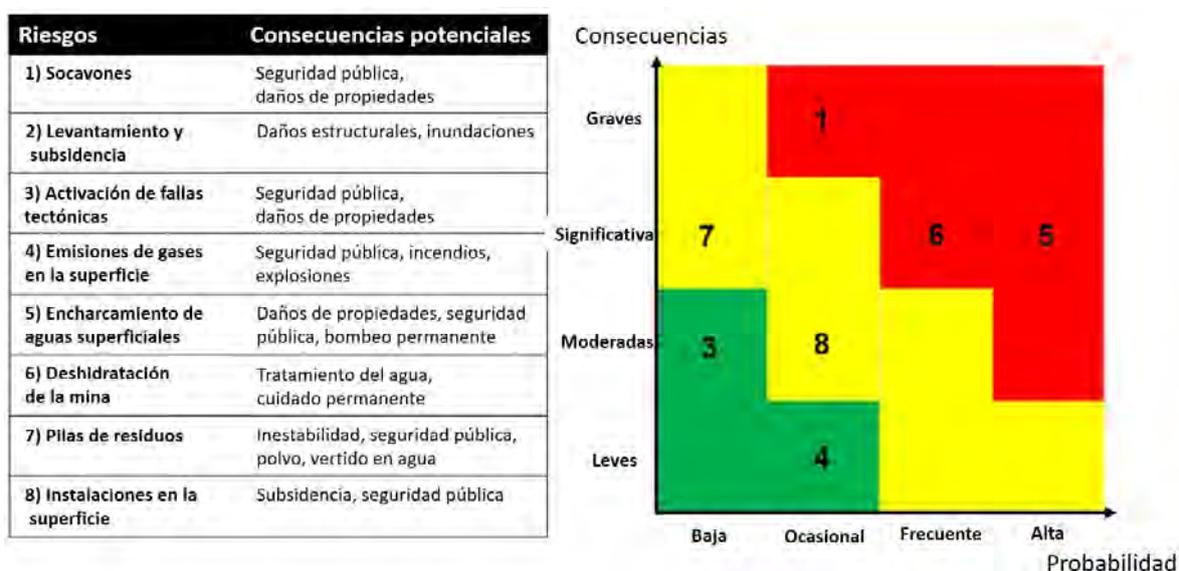


Figura 2: Identificación y evaluación de riesgos.

La fase de cierre y la fase posminera deberían tenerse en cuenta durante la planificación y la puesta en marcha de la mina. Anticiparse de forma temprana a futuros riesgos y potenciales consecuencias hace que la gestión sea más fácil y efectiva. Para esto, el entorno minero y su impacto en sus alrededores deben supervisarse continuamente (Melchers et al., 2015).

En todas las fases del ciclo de vida minero debe disponerse de datos fiables para supervisar el movimiento del terreno, la calidad del agua, el entorno, el ruido y la calidad del aire. La seguridad y la salud de los empleados de las minas y del público suponen una gran preocupación.

4 El programa Copérnico de seguimiento por satélite

El programa Copérnico con sus satélites Sentinel constituye una infraestructura de seguimiento permanente y alta precisión global apropiada para el seguimiento y control de la superficie a nivel minero. El programa genera datos de alta resolución y de teledetección espaciotemporales, así como información medioambiental para sus usuarios.

Los satélites Sentinel-1 están equipados con un sensor de radar de apertura sintética (SAR por sus siglas en inglés) banda C y emiten imágenes de la superficie terrestre independientemente de las condiciones temporales (si es de día o de noche) o meteorológicas. Estas imágenes pueden usarse como base para un seguimiento de alta resolución de movimientos del terreno en áreas impactadas por la actividad minera.

La capacidad de seguimiento del Copérnico se refuerza con el sistema óptico de observación de Sentinel-2, diseñados para detectar e identificar cambios en la superficie terrestre que cubre y su vegetación.

La iniciativa Copérnico combina la vigilancia por satélite con fuentes de datos terrestres, considerados componentes *in-situ* del Copérnico. Estas fuentes de datos pueden incluir información de sistemas de gestión de riesgos, mapas de minas, datos meteorológicos, mapas topográficos e hidrológicos y modelos digitales de elevación. Asimismo, el sistema incorpora la experiencia humana de supervisores de minas, geólogos e hidrólogos que comprenden la actividad minera, los riesgos relativos a las minas y las corrientes de aguas subterráneas y las masas de agua. Las plataformas de gestión de conocimientos usan una estructura de datos geospaciales 4D y la combina con información especializada terrestre y humana para generar un conjunto de información detallada y un registro permanente disponible para científicos, ingenieros y el público. Se tiene así una documentación completa sobre los impactos medioambientales del ciclo de vida de la mina.

El componente espacial del Copérnico posibilita y respalda una variedad de «Misiones Contribuyentes». Estos servicios de satélite adicionales emplean diferentes tipos de sensores para emitir más datos de alta resolución que complementan las imágenes de radar y visuales. Los satélites World View, operados por Digital Globe, pertenecen a estas misiones.

El Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) colabora con sus socios para desarrollar conceptos que usan datos del Copérnico para dar seguimiento a procesos en antiguas y actuales regiones mineras. En este contexto, sería particularmente interesante seguir a nivel de investigación la altamente densa y antigua región minera de la zona del Ruhr. La investigación se centra en la detección de movimientos del suelo, hidratación del suelo, el contenido del agua del suelo, la vegetación y los cambios de infraestructura.

Procesar y evaluar los datos de satélite requiere de la analítica *big data*. Los satélites Sentinel generan una enorme cantidad de datos procesados (y a menudo almacenados durante largos periodos de tiempo) que deben transmitirse a los usuarios. En 2018, el volumen de datos total alcanzó alrededor de 18 petabytes.

Al usarse los datos del Programa Copérnico, pueden mejorarse el seguimiento sobre el suelo y medioambiental con medidas y experiencia terrestre y local, i.e. añadiendo el componente *in-situ*. Esto incluye el mapeo y las medidas de trabajos bajo la superficie que los satélites no pueden detectar. Este proceso puede también identificar nuevas oportunidades posmineras, por ejemplo, aportando un nuevo uso y valor a antiguas infraestructuras mineras y generando energías renovables a partir de fuentes geotérmicas y otras.

5 Ejemplos

Combinar la teledetección desde el espacio del Copérnico con datos terrestres, datos obtenidos sobre el terreno y datos específicos sobre minería interrelacionados con los elementos *in-situ* genera información detallada sobre el ciclo de vida minero. Por ejemplo, las inspecciones sobre el terreno semanales de elementos de minas como los pozos, los depósitos de residuos y las masas de agua se correlacionarían con los movimientos del suelo observados por el Sentinel-1. Esto facilita la detección temprana y previene situaciones peligrosas derivadas de hundimientos, levantamientos o movimientos laterales del terreno y cambios en los niveles del agua. Una base de datos que sigue incidentes y cambios de cada elemento de la actividad minera. El Copérnico mide así los cambios sobre todo el ciclo de vida minero. El sistema también identifica áreas estables y que pueden reutilizarse para nuevos desarrollos, así como áreas cambiantes y que necesitan medidas de estabilización.

El ciclo de vida minero impacta el aire, el suelo y el agua. Los operadores de minas deben proteger el medio ambiente, incluyendo la flora y la fauna. La Comisión Europea ha establecido protecciones para especies y hábitats en peligro en su red Natura 2000. La Directiva Marco europea del Agua establece objetivos específicos para la calidad y la cantidad de las masas de agua. Para cumplir con estas regulaciones de protección medioambiental, las empresas mineras deben establecer las referencias base de los mapas en la planificación inicial de todo proyecto minero. Durante las fases de exploración y explotación, el operador de la mina debe supervisar continuamente todos los impactos medioambientales. El área recogida entre los puntos de referencia y los continuos datos de seguimiento forman la base para planificar, documentar y ejecutar el cierre de mina, la rehabilitación y los procesos posmineros. La figura 3 ilustra los ciclos de planificación y seguimiento y control durante la vida de la mina, desde la exploración hasta las fases tras el cierre.

Los datos del Copérnico son fundamentales para todas las fases de planificación y seguimiento y control y ayudan a los operadores de minas a cumplir con las directivas medioambientales. En 2014, los investigadores de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) de Bochum (Alemania), establecieron un sistema de detección temprana en base al Sentinel-1 para controlar movimientos del suelo en diferentes estructuras mineras, incluyendo pozos y galerías. La figura 4 muestra un estudio de caso donde una masa de agua atravesó y salió rápidamente por la bocamina creada en una antigua galería minera, resultando en una inundación local. Los investigadores pudieron

detectar movimientos del suelo sobre la superficie de la actividad minera con una certeza milimétrica y los correlacionaron con los cambios de la tabla sobre el agua de mina, tal y como se muestra en el gráfico de la figura 4.

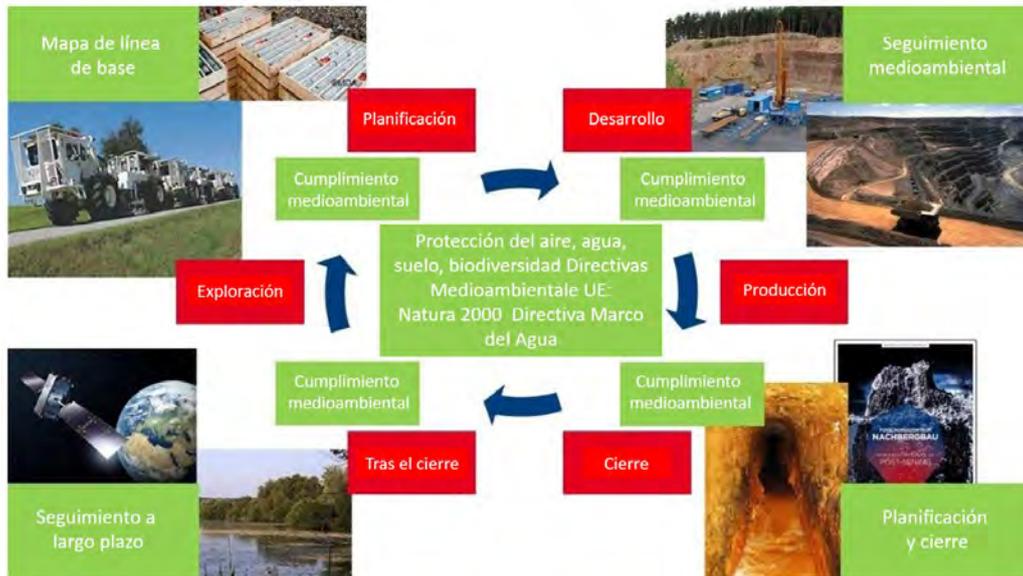


Figura 3: Cumplimiento medioambiental durante el ciclo de vida de la mina.



Figura 4: Seguimiento del movimiento del terreno sobre una galería de drenaje (EFTAS, Google Earth, editado).

Para evitar accidentes de inundación similares en el futuro, los investigadores van a controlar ahora la humedad del suelo, la vegetación y el uso del suelo, y detectarán cambios que indicarán peligros potenciales relacionados con la actividad minera (Müterthies et al., 2019). Esta investigación está financiada por el Instituto Europeo de Innovación y Tecnología (EIT) RawMaterials (literalmente «instituto de innovación y tecnología europeo y de materias primas»).

STINGS es un enfoque novedoso integrado para la supervisión de residuos financiado por la UE y la EIT, y que genera un sistema de detección temprana para presas de residuos. Este sistema integra sensores *in situ* y datos de observación de la tierra, incluidos los datos de radar del Sentinel-1 y los datos ópticos del Sentinel-2 del programa Copérnico. La disposición global de las fuentes de datos de la observación de la tierra permite al sistema supervisar y controlar los pozos de residuos desde su concepción hasta su fase posminera, donde no suele haber datos terrestres. La figura 5 muestra el seguimiento posminero del pozo de residuos de Baia Mare (Rumanía). Hay dos pozos de residuos que se encuentran bajo observación por el seguimiento de movimientos del suelo de Sentinel-1, que usa Interferometría Dispersa Persistente (PSI por sus siglas en inglés). Los puntos PSI mostrados en la figura 5 muestran el movimiento del terreno (véase la gráfica).



Figura 5: Pozos de residuos del estudio STINGS en Baia Mare (Rumanía). Lado izquierdo: datos ópticos de Sentinel-2. Lado derecho: movimiento del suelo observado por los datos de radar de Sentinel-1 usando análisis PSI.

6 Resumen y conclusión

La actividad minera es fundamental para generar materias primas para el mundo. En los últimos años, la minería se ha puesto bajo el escrutinio público por sus impactos negativos en la sociedad y el medioambiente. Los operadores de minas, los reguladores y el público deben entender mejor estos impactos durante el ciclo de vida de la mina, que se han convertido en una parte más del proceso de gestión de riesgos mineros.

Este artículo describe métodos innovadores para seguir los impactos medioambientales de las minas, incluyendo la observación terrestre e *in situ* y los sistemas de sensores de alerta temprana utilizados de la mano del programa gratuito Copérnico de teledetección por satélite.

Todo el ciclo de vida de la mina (desde la exploración y pasando por la planificación, puesta en marcha, cierre y la fase posminera) debe llevarse a cabo de forma sostenible y compatible con el estilo social y medioambiental. Los completos estudios de referencia, el continuo seguimiento y control medioambiental y la analítica *big data* ayudarán a los operadores de minas a gestionar y mitigar los riesgos y peligros que surjan de la actividad minera.

Referencias

Melchers, C.; Goerke-Mallet, P. (2015): Research Institute of Post-Mining, TFH Georg Agricola University of Applied Sciences, Bochum - Strategies, Activities and Research Priorities. Mining Report 151: S. 474-479.

Melchers, C.; Goerke-Mallet, P.; Henkel, L.; Hegemann, M. (2015): Experiences with mine closure in the European coal mining industry: An overview of the situation in Germany and adjacent regions. In: Fourie, A.; Tibbet, M.; Sawatsky, L.; van Zyl, D. (Eds.): Mine Closure 2015: proceedings of the 10th International Conference on Mine Closure, June 1-3, 2015, Vancouver, Canada. Vancouver, British Columbia: InfoMine Inc., S. 711-724 (CD-ROM).

Melchers, C.; Goerke-Mallet, P. (2016): Global post-mining challenges - Experiences gained from the German hard coal mining industry. In: Jaroz, A. (Ed.): XVI International Congress for Mine Surveying (ISM 2016). Connecting education and industry. 12. -16. September, Brisbane, Australia, S. 287-292.

Müterthies, A.; Goerke-Mallet, P.; Melchers, C. (2019): Satellite-borne monitoring measures in the mine life cycle. DMT Mining Forum Berlin.

Publicado por primera vez en: SME Annual Meeting - 23-26 Feb. 2020, Phoenix, AZ, Preprint 20-020, 3 S.

La importancia de la licencia social para operar para el ciclo de vida minero

Peter Goerke-Mallet¹, Tobias Rudolph¹, Jürgen Brune², Jürgen Kretschmann³

¹Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania; ²Colorado School of Mines, Golden, Colorado, EE UU; ³Presidente de la Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

Resumen

En la Conferencia Anual de la Sociedad de Minería, Metalurgia y Explotación (SME) de febrero de 2020 en Phoenix (Arizona), uno de los focos fue el término *licencia social para operar*. El título de la sesión principal fue: «El rol de los ejecutivos en la gestión de residuos: preservar nuestra licencia social para operar».

En vista de los recientes accidentes en presas de residuos mineros, la propia industria minera debe reconsiderar su licencia social para operar o, dicho de otra manera, su responsabilidad como operador y la aceptación pública de su negocio. Fue en enero de 2019 cuando se produjo la reciente ruptura de la presa de residuos cerca de la ciudad brasileña de Brumadinho. El masivo derrame de residuos de la mina a cielo abierto de mineral de hierro Córrego do Feijao se cobró más de 270 víctimas, contaminando el espacio ladera abajo con un volumen de lodo de casi 12 millones de metros cúbicos. Una amplia investigación de este desastre y muchos otros incidentes similares recientes mostró que las empresas mineras deben tratar urgentemente la operativa segura de depósitos de residuos desde arriba, desde los niveles ejecutivos. Los responsables deben reconocer que el *business as usual* ya no es una opción más. No basta ya con depender únicamente de un permiso de minería emitido por el gobierno que cubriría los aspectos técnicos de la minería y del procesamiento porque que el operador minero debe tener en cuenta una mayor variedad de contribuciones y preocupaciones de *stakeholder* para obtener la licencia social.

Este artículo analiza cómo pueden operar las minas de forma sostenible (en el sentido más amplio) y los esfuerzos requeridos para asegurar una aceptación pública durante el ciclo de vida minero. Los resultados muestran que una operación socialmente responsable requiere que los procesos mineros sean totalmente abiertos, incluyendo los resultados de geomonitoreo a largo plazo.

1 Introducción

Como industria de producción primaria, la minería y sus productos se sitúan al principio de las cadenas de valor. La minería satisface las necesidades de materias primas de la población mundial. Con una predicción de un crecimiento de hasta 10 000 millones de personas en 2050, y la demanda de materias primas se prevé que aumente proporcio-

nalmente, aunque se espera también que el progreso tecnológico cambie el conjunto de las materias primas. Las experiencias personales de los consumidores con productos obtenidos a través de la actividad minera (procesados y finales), como edificios, automóviles y electrónicos, se está desapareciendo de la industria de las materias primas. Así, los consumidores ya no reconocen que su móvil contiene 70 o más productos obtenidos a través de minas. En otras palabras, el público tiene poca experiencia con el ciclo de vida de una mina (Figura 1).



Figura 1: Ciclo de vida de una mina (de acuerdo con 25, editado).

Esta desvinculación en la comprensión de los procesos técnicos y científicos lleva a un sentido de la responsabilidad que va desapareciendo: el público no reconoce ya que su comportamiento como consumidor necesita de la minería. Al mismo tiempo, las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales están repensando cómo enfoca la protección del clima y del medioambiente a raíz del cambio social y los retos de la digitalización (1). Muchas sociedades promueven un reciclado de circuito cerrado, algo que impacta también en la extracción de materias primas, la cual es a su vez siempre necesaria para para la gestión este tipo de reciclado y se está haciendo a un lado (2, 3). Sin embargo, los efectos de los procesos mineros en las personas que viven cerca de explotaciones mineras y en su entorno se ven en los medios. La minería se ridiculiza constantemente, y resulta a menudo difícil para las empresas comunicarse con el público de forma frecuente basándose en hechos y para hacer que sus decisiones sean transparentes.

Las fuertes disputas sobre la ubicación y los métodos para obtener recursos minerales y la organización de las cadenas de suministros causan muchos problemas (4). Las limitaciones naturales de los yacimientos limitan la sostenibilidad de las minas, y, aun así, la industria debe hacerse cargo de sus impactos ecológicos, sociales y económicos. Ante los accidentes en plantas de procesamiento y depósitos de residuos, el *Science Policy Report* (informe sobre política científica en español) de la Academia Brasileña de Ciencias y la Academia Nacional de Ciencias Alemana (conocida como Leopoldina) están redirigiendo su foco hacia prácticas mineras más sostenibles y animando a los legisladores, las empresas mineras, la comunidad científica y al público a unirse (5).

La licencia social para operar es clave para integrar la sostenibilidad en la minería. Esta representa una base fundamental de las actividades mineras y debe definirse desde diferentes perspectivas. Para las empresas, este término comprende la responsabilidad del operador, o la licencia para operar durante todo el ciclo de vida de la mina. La empresa adquiere esta licencia a partir de permisos, estudios de impacto medioambiental, geomonitoreo y sistemas de gestión de riesgos, pero también creando confianza entre el público. El público general y los grupos de interés claves garantizarán la licencia social para operar a la empresa en base a la fiabilidad y la confianza en la misma, su comunicación y su transparencia. Establecer un sistema de geomonitoreo integrado y continuo para todo el ciclo minero genera transparencia y permite una comunicación abierta sobre el seguimiento y control de los resultados con los *stakeholders*.

Desde una perspectiva sostenible y de conservación del fundamento natural de la vida, se pueden identificar dos procesos fundamentales en el contexto de fuerzas, estilos y valores (Figura 2) (1).

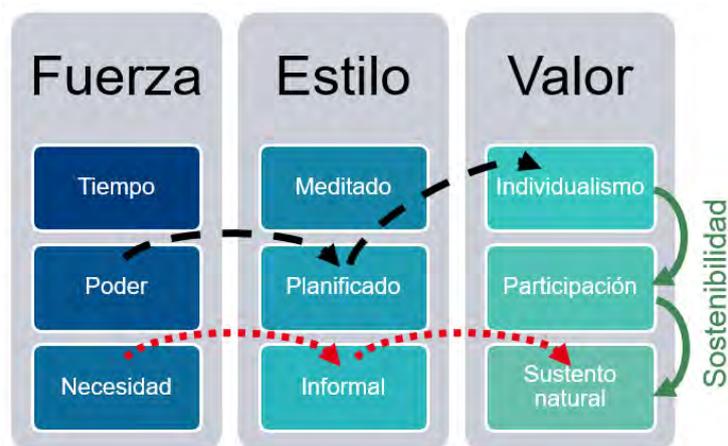


Figura 2: Esquema de procesos globales dominantes en términos de fuerzas, estilos y valores (de acuerdo con 1, editado).

Históricamente sencilla, la antigua actividad minera, aún practicada en el campo de la minería artesanal empieza con la necesidad de preservar la base de la vida, mostrada por la línea roja en la figura 2. En un ciclo de vida minero más desarrollado y dominado por la industria, la minería asume una posición de poder y actúa siguiendo un plan empresarial mediante acciones como la adquisición de ubicaciones estratégicas (mostrado por la línea continua negra de la figura 2). Integrar conceptos contemporáneos de la responsabilidad social del operador permite a las partes afectadas participar, y a cambio lleva a una mejora del fundamento natural de la vida, resultando en una mayor sostenibilidad (mostrado por la línea discontinua verde de la figura 2). Porque una licencia social para operar significa también una mayor sostenibilidad.

Recientes impresiones de EE UU motivaron a los autores ir más allá de la gestión de riesgos para tratar el reto de mantener y mejorar la reputación y la aceptación social. Este artículo busca motivar un mayor debate en nuestra industria y dar argumentos de hecho.

2 La Conferencia SME 2020 de Phoenix (Arizona)

Conferencia Anual de la Sociedad de Minería, Metalurgia y Explotación (SME) de febrero de 2020 en Phoenix (Arizona). La Sociedad de Minería, Metalurgia y Explotación (SME) es una de las mayores asociaciones mineras con más de 12 miembros a lo largo del mundo (6). «MineXchange», la temática de la conferencia de febrero de 2020 en Phoenix (Arizona), buscaba subrayar cambios en la minería y la importancia de compartir ideas y conocimientos (8). La conferencia, esperada a nivel global, ofrecía oportunidades para hacer *networking* y compartir información actualizada. La exhibición, con sus más de 700 empresas, organizaciones e instituciones, complementó el extenso y formativo programa de conferencias. Una conferencia de esta magnitud requiere de numerosos simpatizantes. La empresa de Phoenix Freeport-McMoRan, por ejemplo, fue espónsor de toda la conferencia. La sesión de apertura fue «El rol de los ejecutivos en la gestión de residuos: preservar nuestra licencia social para operar», un debate altamente participativo (7).

Las empresas mineras que han ido haciendo frente a un creciente número de rupturas de presas en balsas de estériles mineros deben desarrollar soluciones de procesamiento de residuos más efectivas. Durante una mesa redonda, cuatro top managers de las empresas Consol Energy, Freeport-McMoRan, Mosaic Kali y Newmont-Goldcorp presentaron sus puntos de vista sobre el problema y el tratamiento operativo de los depósitos de residuos. El objetivo era descubrir los cambios en la gestión de empresas considerados necesarios con el fin de evitar incidentes en el futuro. ¿Cómo pueden reducirse los riesgos de la pérdida de reputación y cómo puede mantenerse la aceptación del público de la minería?

Estadísticamente, se han producido dos incidentes por año en depósitos de residuos en los últimos cincuenta años, y la escala de los incidentes ha aumentado en cuanto a la cantidad de lodo derramado y el número de víctimas (9). En enero de 2019, la ruptura de una presa de un depósito de residuos de una mina a cielo abierto de mineral de hierro cerca de la ciudad brasileña de Brumadinho se cobró más de doscientas setenta víctimas y el entorno fue severamente contaminado por un volumen de lodo de casi doce millones de centímetros cúbicos.

Los recientes efectos catastróficos de rupturas de presas en balsas de estériles mineros en Brasil y Canadá, entre otros, han dañado enormemente la confianza del público en la minería y han llevado a un endurecimiento de los requisitos y controles oficiales. Muchas contribuciones de la conferencia mostraban que las empresas mineras están reconociendo la importancia económica de las expectativas sociales y medioambientales de los *stakeholders* (7). La integración de nuevos enfoques y tecnologías en las actividades operativas en las áreas del medioambiente, seguridad, sanidad y asuntos sociales, así como una considerable gestión de riesgos, se perciben como una ventaja competitiva.

También es importante establecer un sistema de geomonitoreo completo y continuo para todo el ciclo minero. Para este, se pueden seguir diferentes métodos, dependiendo de las cuestiones implicadas, pero los respectivos resultados deberán considerarse y evaluarse íntegramente (10). En el geomonitoreo de los residuos de depósitos, no basta

con usar solo datos obtenidos mediante teledetección por radar, como los datos del Sentinel-1 del programa Copérnico de la UE sobre movimientos terrestres. Se deben utilizar también inspecciones y sensores *in-situ*. Esta es la única manera de asegurar una detección temprana de potenciales problemas y de confirmarlos.

Para los proyectos mineros en una fase temprana de desarrollo, el público y los *stakeholders* deben involucrarse en las cuestiones de la planificación desde el principio (11). Un enfoque holístico podría complicar la gestión del proyecto y el proyecto de comunicación externa inicialmente, pero al final resultará en una aceptación más fuerte del proyecto. Esfuerzos de desarrollo considerables, como la creación de transparencia y la comunicación permanente siguen siendo necesarios para la sostenibilidad. El alcance y la profundidad del tratamiento de los desafíos para garantizar la seguridad de las operaciones en balsas de estériles mineros muestra la concienciación que hay sobre los riesgos en la industria. Dados los desarrollos de los últimos años, no puede haber *business as usual*. De hecho, nunca ha habido una impresión de que el tratamiento de esta cuestión se fuese disimulando, i.e. no se habría intentado hacer *greenwashing*.

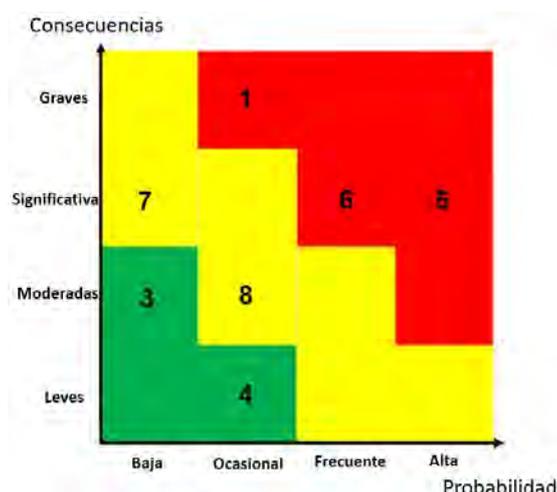


Figura 3: La gestión de riesgos en la minería: matriz de la probabilidad frente a consecuencias.

La gestión de riesgos tiene un rol clave al lidiar con cuestiones de seguridad relacionadas con el procesamiento de residuos (Figura 3). A fin de poder evaluar de manera fiable los riesgos asociados con la operativa de instalaciones mineras y ajustar, por consiguiente, la forma de operar necesita de (geo)datos 4D, de información y de conocimientos de gestión lo más completos posibles. La conferencia presentada por los autores de este artículo y otros expertos en este evento se integró en este contexto. Trataba el uso de datos obtenidos a través de sensores de satélites para mejorar la gestión de riesgos en la «posminería¹» (12). Los proyectos investigan qué información puede usarse para

¹ N. de T.: Se utilizan los términos *posminero*, *posminería* y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por *posminería* para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la *t* y el guion tras el prefijo *pos* por no ir seguido de *s*). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

detectar los terrestres, cambios en la humedad del suelo y vegetación, y detectar cambios generales en las balsas y la masa de lodos de los depósitos de residuos. El objetivo de las investigaciones es usar datos del programa Copérnico de la UE para la detección temprana de cambios importantes a nivel de seguridad en instalaciones mineras en todas las fases del ciclo de vida de la mina.

3 El término licencia social para operar

En el desarrollo del debate sobre la *sostenibilidad*, se desarrolló la expresión *licencia para operar* hace alrededor de dos décadas. Este término refleja la reputación empresarial y su aceptación social. Sin esta «licencia», hay grandes dudas entre los *stakeholders* relacionados con la empresa sobre si el modelo de negocio o sus proyectos tienen sentido. La voluntad para cooperar con la empresa tiende a cero en este caso.

Desde una perspectiva empresarial, asegurar y reforzar la «licencia para operar» lleva a una atmósfera positiva en la que pueden implementarse la estrategia de la empresa y su creación de valor (13). Las empresas aceptadas socialmente suelen tener éxito a la hora de alcanzar la sostenibilidad, lo que (en el pilar «valores» de la Figura 2) se alcanza pasando de la individualidad a la participación y a los fundamentos naturales de la vida. Lidian muy proactivamente con todas las consecuencias económicas, ecológicas y sociales de sus acciones. En este contexto Löhr (14) habla de la credibilidad de la acción corporativa. Afirma que hay que dar tiempo a las empresas para aumentar gradualmente su propia credibilidad. Sin embargo, el proceso no puede verse únicamente con el logro de objetivos económicos, sino más bien en función de las personas y el medioambiente.

La universidad de British Columbia en Vancouver (Canadá) ha ido impulsando el debate sobre la aceptación social de las actividades mineras durante un tiempo. Por ejemplo, Nielsen (15) investigaba las condiciones en numerosas minas de diferentes partes del mundo. De acuerdo con él, los *stakeholders* de la industria minera están demandando una mayor y mayor participación en las decisiones que les afectan directamente. Muchas empresas aprendieron que las iniciativas voluntarias, más allá de las responsabilidades reguladas, son esenciales para generar aceptación. Sin embargo, y a pesar de un elevado nivel de concienciación sobre la aceptación social entre las empresas, no hay un consenso sobre el uso efectivo de la concienciación social (15). Asimismo, el éxito de la aceptación social se basa en gran medida en el establecimiento y mantenimiento de relaciones sostenibles con los *stakeholders*. Así, el enfoque participativo es de importancia clave.

La *licencia social para operar* se usó originalmente como expresión pictoresca para destacar lo positivo que es la integración de la empresa en las estructuras que la rodean (16). Esto se ha convertido ahora en un sistema para gestionar tareas en tiempos difíciles. Esta estrategia se dirige a los grupos de interés y la gestión de estructuras sociopolíticas complejas. Al final, todas las empresas necesitan tener en cuenta cuestiones sociales (el factor humano) y del medioambiente y, por tanto, necesitan usar esta estrategia.

La industria del gas y el petróleo (de exploración y producción o E&P) en Alemania es un ejemplo. Wintershall DEA combina la responsabilidad del operador con la digitaliza-

ción, resultando en una cultura corporativa coherente y transparente que genera un acceso casi ilimitado a la información y una cooperación entre empresas. El desarrollo iniciado con las herramientas digitales sigue enfoques *top-down* y de *bottom-up* (17). Por ejemplo, los empleados de Wintershall DEA están preguntando más y más sobre el porqué de su trabajo, sus responsabilidades y sus competencias.

Los debates sobre la aceptación social de las empresas y sus acciones han ido incorporando más y más el concepto de sostenibilidad (18). En 2016, las Naciones Unidas intensificaron y expandieron el debate sobre la gestión sostenible de procesos operativos al formular 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (19). En todos los sectores de producción primaria, y especialmente en la minería, se deben tratar cuestiones críticas para el público y los *stakeholders*. Este es el contexto de un estudio de Kleiner (20), quien usa el término de *ética económica*.

Los 17 Objetivos de Desarrollo están relacionados con la producción primaria en la industria minera y son vitales para alcanzar los objetivos sostenibles. Las materias primas forman la base para los procesos productivos y los yacimientos deberían usarse de manera sostenible y eficiente, ya que el crecimiento económico y de la población aumenta la necesidad de recursos.

¿Cómo puede la industria minera aplicar estas demandas éticas y morales y mejorar significativamente los estándares de sus procesos operativos? ¿Puede la industria minera seguir operando de forma ética? ¿Y qué es su licencia social para operar?

La minería debería llevarse a cabo de forma responsable y respetando los estándares definidos por los 17 objetivos. Los procesos mineros tienen a menudo un impacto por lo menos temporal en la naturaleza y el paisaje y frecuentemente causan cambios irreversibles. Dado que los depósitos mineros tienen un volumen limitado, no son sostenibles. Sin embargo, la industria minera contribuye con acciones para alcanzar estos objetivos en muchas áreas, como con estudios de impacto medioambiental (21). La seguridad operativa y los procesos de comunicación deben cumplir con los estándares. La participación de la población regional en términos económicos e informales, por ejemplo, en las reuniones de *stakeholders* y el compromiso de la comunidad en la planificación es también primordial (5).

Limitar la influencia de la extracción de materias primas y aumentar simultáneamente la sostenibilidad puede hacerse a través del geomonitoreo (Figura 4). Integrar completamente métodos aéreos digitales (por ejemplo, satélites, campañas de medición aéreas, drones), la superficie (por ejemplo, inspecciones, sensores *in-situ*), y el subsuelo (por ejemplo, geofísica de pozos) crea un entendimiento transparente de los procesos espaciotemporales. Como resultado, el geomonitoreo representa una base esencial para la social responsabilidad del operador.



Figura 4: La doble triada del geomonitoreo como base para la comunicación y social responsabilidad del operador.

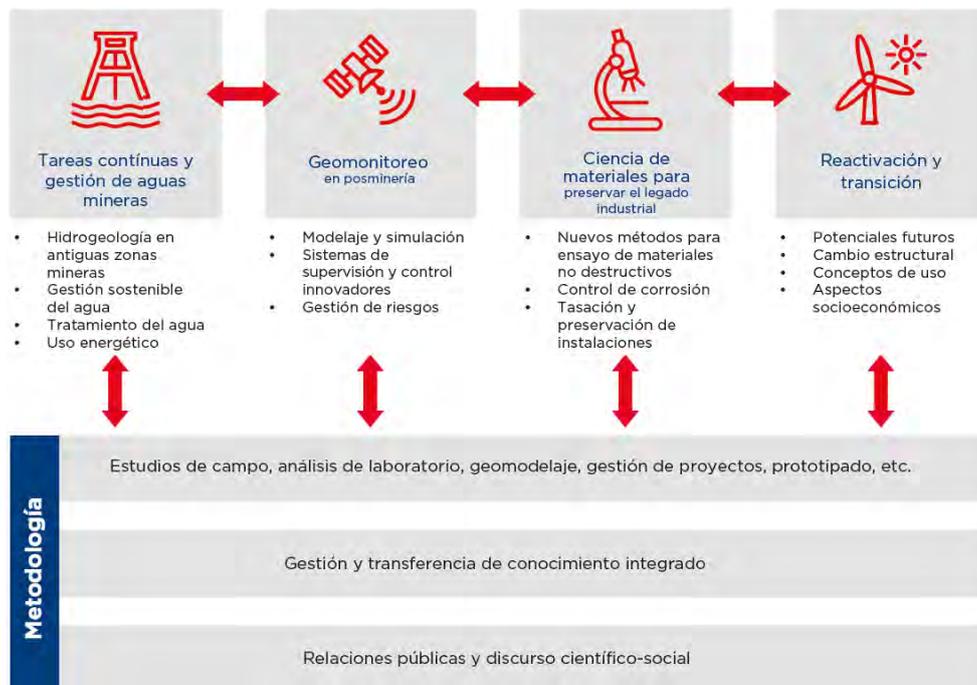


Figura 5: Áreas de investigación del FZN de la THGA.

Con el fin de alcanzar los retos del ciclo de vida minero y la fase tras el cierre de la mina, el Centro de Investigación Posminera (Forschungszentrum Nachbergbau o FZN por sus siglas en alemán) de la THGA ha desarrollado un enfoque integrado que cubre cuatro áreas de investigación (Figura 5) (22):

1. gestión de tareas permanentes y aguas de minas;
2. geomonitoreo de áreas mineras y posmineras;
3. ciencias materiales para la preservación y reutilización de la herencia industrial; y
4. reactivación y transición.

Estas cuatro áreas cubren los requisitos a cumplir para un uso responsable y sostenible de los recursos de la Tierra.

El enfoque de la industria minera para la diligencia debida de las cadenas de suministros supone otra oportunidad de investigación. Pateiro Fernandez (23) habla sobre el desarrollo de enfoques adaptados a la situación local para interpretar el paradigma sostenible y se refiere a la reacción específica a condiciones marco existentes. El objetivo es minimizar los impactos negativos en el medioambiente y la sociedad mientras se maximizan factores sociales y económicos. La participación, que constituye una parte esencial del concepto de sostenibilidad, debería resultar en la aceptación social de las medidas mineras. También cabe considerar los Principios del Ecuador utilizados por los bancos en la financiación de proyectos (24). Se trata de un conjunto de reglas voluntarias basadas en las normas sociales y medioambientales del Banco Mundial.

En resumen, un proceso minero sostenible será sostenible solo si el uso de los yacimientos lo es. Por ello, debe tener en cuenta los aspectos económicos, ecológicos y sociales en igual medida. Un desarrollo será sostenible solo si sus acciones se basan en hechos y si se genera suficiente transparencia a través de la comunicación con todos los *stakeholders*.

La aceptación pública de los proyectos mineros debe estar relacionada con todo el ciclo de vida minero. Las condiciones específicas espaciotemporales de la minería y su forma de operar dinámica generan retos para mantener la credibilidad y fiabilidad entre el público. La comunicación con el público sobre los procesos y resultados es clave y se alcanzará a través de una supervisión continua (Figura 6).

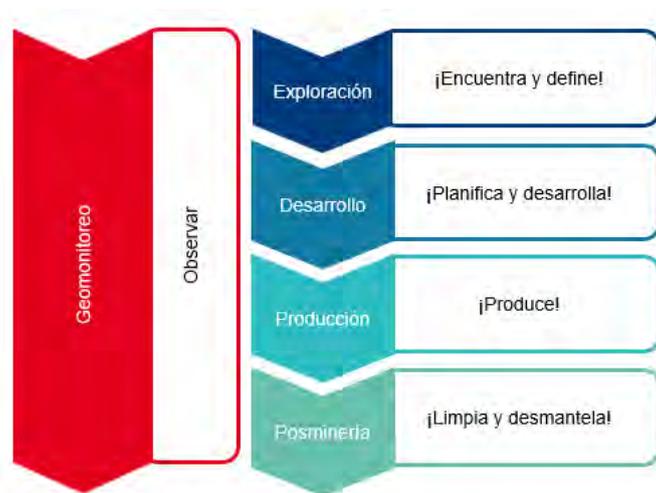


Figura 6: El geomonitoreo en el ciclo de vida minero (de acuerdo con 25, editado).

Los acontecimientos de la plataforma Brent Spar de Shell Oil constituyen un ejemplo de típicas disputas de *stakeholders*. El yacimiento de petróleo de Brent está en el Atlántico Norte entre las Islas Shetland y la costa noruega, al oeste de la ciudad de Bergen. La plataforma se construyó en 1976 como un depósito flotante de petróleo e instalación de carga; se cerró en 1991 porque los oleoductos y gasoductos habían asumido entretanto

las tareas logísticas. Shell planeó hundir la Brent Spar en la fosa oceánica al oeste de Irlanda en 1995. En abril de 1995, Greenpeace ocupó la plataforma para prevenir su hundimiento, sentando un nuevo precedente (26). Tras muchos años de análisis con instituciones relevantes, las autoridades británicas aprobaron el hundimiento. Ante la presión del público y el boicot de las gasolineras alemanas, Shell decidió en junio de 1995 deshacerse de la plataforma Brent Spar en tierra. Unos meses después, Greenpeace admitió que había difundido información que exageraba la cantidad de residuos de petróleo de los tanques de la Brent Spar. Esto fue seguido de una disculpa pública, pero no tuvo ningún impacto en la pérdida reputacional ni de la empresa petrolera ni en la organización medioambiental.

El yacimiento petrolífero de Brent está casi agotado desde hace muchos años, y el desmantelamiento de las cuatro plataformas de perforación que quedan está en marcha. Se han hecho más de trescientos estudios, ciento ochenta organizaciones y cuatrocientos individuos han participado en el estudio del destino de las estructuras de soporte en el mar. Todavía no existe una orientación clara para su eliminación. El problema reside en los residuos de petróleo de los tanques que están contruidos en las estructuras de soporte y en el riesgo de una contaminación medioambiental. Además del gobierno británico, los cincuenta países que firmaron el Convenio para la Protección del Medio Marino del Atlántico Nordeste (OSPAR por sus siglas en inglés) también participan en el proceso de la toma de decisiones (27).

El ejemplo muestra la complejidad de la comunicación y la transparencia en relación con las decisiones corporativas y políticas. También muestra cómo de importante es enfatizar la necesidad de tomar acciones basadas en hechos por todas las partes. Los acontecimientos que rodean la producción de petróleo y gas del área de Brent no pueden minar los esfuerzos para seguir con los objetivos de sostenibilidad. Este ciertamente difícil caso debería impulsar positivamente a los expertos mineros.

4 Conclusiones

En el ciclo de vida minero se está volviendo más y más importante reflexionar sobre la responsabilidad social del operador. De hecho, las graves carencias de pozos de residuos han traído al foco público esta cuestión. Los cambios técnicos en la sociedad, incluida la digitalización, y los cambios hacia una economía circular están causando un replanteamiento técnico entre el público, que se corresponde con un declive de la aceptación y el conocimiento técnico de la actividad minera. Con el fin de aumentar la aceptación y generar un mayor entendimiento, las empresas mineras deben abrirse, volverse transparentes e invitar a la participación pública. La gestión de proyectos debe incluir un geomonitoreo completo y un proyecto de comunicación externa. Un geomonitoreo totalmente integrado en el ciclo de vida minero es clave para el éxito de la responsabilidad social para operar en la minería.

Referencias

- (1) WBGU - Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: Der Umzug der Menschheit – Die transformative Kraft der Städte. Zusammenfassung. Berlin, 2016. 43 S.
- (2) Hiebel, M.; Bertling, J.; Nühlen, J.; Pflaum, H.; Somborn-Schulz, A.; Franke, M.; Reh, K.; Kroop, S. (Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.): Studie zur Circular Economy im Hinblick auf die chemische Industrie. Studie im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V., Landesverband NRW. Oberhausen, 2017. 178 S. URN: urn:nbn:de:0011-n-4769003.
- (3) Müller, F.; Kohlmeyer, R.; Krüger, F.; Kosmol, J.; Krause, S.; Dorer, C.; Röhreich, M.: Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 34 S., 2020.
- (4) Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), Referat Öffentlichkeitsarbeit, digitale Kommunikation, Besucherdienst (Hrsg.): Der Zukunftsvertrag für die Welt – Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. 26 S., Stand März 2017. URL: http://www.bmz.de/de/mediathek/publikationen/reihen/infobroschueren_flyer/infobroschueren/Materialie270_zukunftsvertrag.pdf (visitado por última vez el 29/06/2020).
- (5) Apaéstegui Campos, J.; Brandão, L.; Camargo de Azevedo, A.; Casanova, M.; Cord, A.; Gerner, N.; Giese, E.C.; Händel, F.; Jager, N.; Jessen, G.L.; Lepenies, R.; Maia Barbosa, P.; Marchezini, V.; Pujoni, D.; Salma, A.; Santos Sánchez, A.; Schierz, A.; Stemke, M.; Ussath, M.; Val, P.; Whaley-Martin, K.; Yoshie Yamamoto, F.; Zorzal-Almeida, S. (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V., Nationale Akademie der Wissenschaften u.a.): A new vision of sustainable management in mining and post-mining landscapes. Science Policy Report, 30 S., October 2019. Halle (Saale) u.a.
- (6) Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME): URL: <https://www.smenet.org/> (visitado por última vez el 14/05/2020).
- (7) Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME): Mine Change – SME Annual Conference & Expo, February 23 - 26, 2020, Phoenix, AZ. Technical Program. URL: https://www.smeannualconference.com/2020smeannualconference/assets/techsessionsflipbook/SMENETechSessions2020Guid_Lv3.pdf (visitado por última vez el 14/05/2020).
- (8) Goerke-Mallet, P.; Hegemann, M.; Brune, J.; Kretschmann, J.: Die “Society for Mining, Metallurgy and Exploration“ – SME und ihre Jahrestagung 2020 in Phoenix, USA: Themen, Botschaften, Eindrücke. In: Bergbau, 71(8) 2020. S. 364-368.
- (9) WISE: Chronology of major tailings dam failures. 2020. URL: <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (visitado por última vez el 02/07/2020).
- (10) Rudolph, T.; Goerke-Mallet, P.; Melchers, C.: Geomonitoring im Alt- und Nachbergbau. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 145(3) 2020. S. 168-173.

- (11) Lerch, F.: Erfolgreiche Realisierungsdialog für E&P-Projekte – ein Beispiel. In: Erdöl Erdgas Kohle, 136(6) 2020. S. 21-23.
- (12) Goerke-Mallet, P.; Brune, J.; Möllerherm, S.; Kretschmann, J.; Rudolph, T.; Mütterthies, A.: Post mining analytics from space: an innovative approach to improve risk-management in mining. SME Annual Meeting, 23 to 26 Feb. 2020, Phoenix, AZ, Preprint 20-020, 3 S., 2020.
- (13) Lin-Hi, N.: Licence to operate. In: Gabler Wirtschaftslexikon. Revision von Licence to operate vom 19.02.2018 - 15:10. - URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/licence-operate-51612/version-274773> (visitado por última vez el 04/06/2020).
- (14) Löhr, A.: Interview: „Noch sind es nicht viele Firmen“. In: Spektrum der Wissenschaft, 2003(12): 94. URL: <https://www.spektrum.de/magazin/interview-noch-sind-es-nicht-viele-firmen/830326> (visitado por última vez el 04/06/2020).
- (15) Nelsen, J.L.: Social license to operate: integration into mine planning and development. Master thesis, Vancouver, BC, University of British Columbia, 127 pp, 2007. URL: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0081173> (visitado por última vez el 26/06/2020).
- (16) Black, L.: The social license to operate – your management framework for complex times. DoSustainability (DōShorts series), Oxford, 100 S., 2013.
- (17) DGMK Webinar: Digital Transformation – The people component. DGMK-Veranstaltung Aufsuchung und Gewinnung vom 28.05.2020. URL: <https://dgmk.de/veranstaltungen/dgmk-webinar-digital-transformation-the-people-component/> (visitado por última vez el 03/07/2020).
- (18) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): Nachhaltige Entwicklung als Handlungsauftrag. – Stand: 16.08.2017. URL: www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit-internationales/nachhaltige-entwicklung/strategie-und-umsetzung/nachhaltigkeit-als-handlungsauftrag/ (visitado por última vez el 03/06/2020).
- (19) Engagement Global gGmbH (Hrsg.): [Siebzehn] Ziele für nachhaltige Entwicklung. 2019. URL: <https://17ziele.de> (visitado por última vez el 04/06/2020).
- (20) Kleiner, M.: Die Bedeutung von Stakeholder-Dialogen aus Sicht der Interaktionsökonomik – illustriert am Beispiel eines Bergbau-Unternehmens. Dissertation, HHL Leipzig Graduate School of Management, 2016. VIII + 184 S. URL: <https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A7816/attachment/ATT-o> (visitado por última vez el 04/06/2020).
- (21) Goerke-Mallet, P.: Aufstellung eines Rahmenbetriebsplanes mit Umweltverträglichkeitsuntersuchung – eine Herausforderung an das Kommunikations- und Informationsmanagement. In: Das Markscheidewesen in der Rohstoff-, Energie- und Entsorgungswirtschaft, 42(18) 1999. S. 81-86.

- (22) Kretschmann, J.: Forschungsbereiche im Nachbergbau. In: Mining Report Glückauf (156) Heft 2, 2020. S. 146-156.
- (23) Pateiro Fernandez, J.B.: Nachhaltigkeit im Bergbau. Indikatoren und Beurteilungssystem. Dissertation RWTH Aachen, 2008. 263 S. URL: <https://d-nb.info/990723992/34> (visitado por última vez el 26/06/2020).
- (24) World Bank Group: The Equator Principles (EP´s). 2019. URL: <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/library/equator-principles-eps> (visitado por última vez el 06/07/2020).
- (25) Stanley, J.; Wilkinson, S.T.; Moreno Ramírez, D.; Maier R. M.; Chief, K.: Tribal Mining Educational Modules: Copper Mining and Processing. IV.Life Cycle of Mine, 2015, pp. 11-14. Tuscon, AZ: The University of Arizona, Superfund Research Program. URL:https://www.superfund.arizona.edu/sites/superfund.arizona.edu/files/copperminingandprocessing_final.pdf (visitado por última vez el 02/07/2020).
- (26) Greenpeace: 25 Jahre Brent Spar. Ein Erfolg schreibt Geschichte. 2020. URL: www.greenpeace.de/kampagnen/25-jahre-brent-spar (visitado por última vez el 04/06/2020).
- (27) Süddeutsche Zeitung: Brent Spar wurde für Greenpeace zum größten Sieg. 2020. Stand: 29.4.2020, 10:10 Uhr. URL: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/umwelt-berlin-brent-spar-wurde-fuer-greenpeace-zum-groessten-sieg-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-200429-99-871769> (visitado por última vez el 04/06/2020).

Publicado por primera vez en: Mining Report Glückauf 156 (2020) No.4, pp. 323-332.

Perspectivas

El Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau): fundado en 2015, avanzando hacia un futuro prometedor

Ulrich Paschedag

Director del Forschungszentrum Nachbergbau (Centro de Investigación de Posminería), Vicepresidente de la Technische Hochschule Georg Agricola University, Bochum, Alemania

1 Introducción

El recientemente reorganizado Centro de Investigación de Posminería (Forschungszentrum Nachbergbau) de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA), fundado en 2015, ha desarrollado un enfoque integrado para hacer frente a los retos de la «posminera»¹. El término *posminería* se refiere a todos los procesos y tareas que hay una vez se han extraído todos los recursos naturales. La posminería cubre actualmente cuatro áreas de investigación distintas (Figura 1).

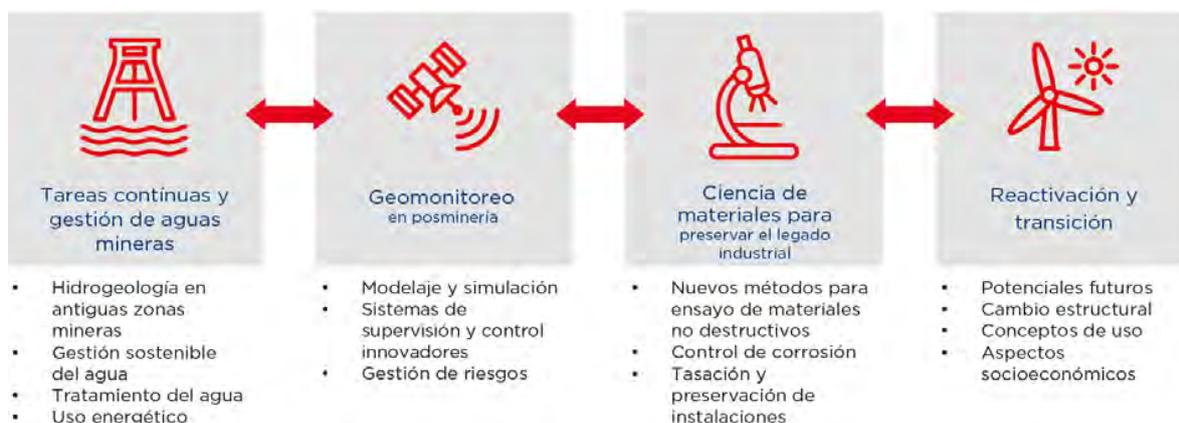


Figura 1: Nueva estructura del Centro de Investigación de Posminería.

La actividad minera deja una huella tras de sí, y lidiar con esta no es únicamente un tremendo reto para nosotros en Alemania, sino también a nivel internacional. Una institución diferente a cualquier otra en el mundo, el Centro de Investigación de Posminería

¹N. de T.: Se utilizan los términos «posminero», «posminería» y derivados (no admitidos oficialmente en la Real Academia Española) para referirse a las fases y procesos que derivan del cierre de las minas, habiéndose comprobado su uso frecuente en el sector minero y en los estudios de esta ingeniería. Asimismo, en textos que siguen la norma latina puede encontrarse frecuentemente el uso de «post-minería», aunque se opta por «posminería» para respetar la norma ortográfica del español (omitiendo la «t» y el guion tras el prefijo «pos» por no ir seguido de «s»). Se ha realizado una consulta a la Real Academia Española sobre la inclusión de este término por su uso técnico.

(Forschungszentrum Nachbergbau) se ocupa de las cuestiones que surgen cuando finaliza la actividad minera. Tenemos un equipo científico experto e independiente que investiga las complejas tareas relativas a todos los aspectos del desmantelamiento, la restauración y el posterior uso de lugares en los que se habría llevado a cabo actividad minera. A través de este proceso también podemos identificar el futuro potencial del periodo posminero.

La de la Technische Hochschule Georg Agricola University (o THGA) de Bochum ofrece el escenario perfecto para esta labor: durante más de 200 años, los recursos naturales han dado forma nuestra singularísima escuela. Para nosotros, esto significa que podemos dedicarnos ampliamente a la cuestión sobre el «después». Nuestras actividades de investigación giran actualmente en torno a las tareas que surgen en relación con la suspensión de la minería activa de carbón en Alemania. Dicho esto, la posminería no se limita en absoluto a las áreas mineras del Ruhr, el Sarre o Ibbenbüren. Consideramos que tiene un alcance global y que cuenta con potencial dentro de todas las ramas de la actividad minera del mundo. Con este fin, trabajamos con socios internacionales de prestigio, del mismo modo que lo hacemos con autoridades públicas, empresas e instituciones científicas de nuestras regiones.

El centro trata la urgente necesidad de información científica y fiable en estas áreas. Más allá de su activa red nacional, también trabaja activamente por extender su red internacional en beneficio de todos los grupos sociales y del medioambiente. En combinación con el curso de máster Geotechnical Engineering and Post-Mining («ingeniería geotécnica y en posminería» en español), se enseña a estudiantes que la posminería es una parte fundamental del ciclo de vida de la mina.

La posminería incluye todo lo que ocurre tras la verdadera extracción de los minerales y materias primas. Es un campo muy amplio, ofreciendo mucho contenido para investigación en ingenierías. Investigamos todas las facetas de la posminería y seguimos redescubriendo el potencial que tiene. Además, todo lo que vamos descubriendo aquí también contribuye a hacer que los procesos mineros sean más ecológicos y sostenibles.

El Centro de Investigación de Posminería combina la experiencia de todos los campos en nuestra tarea de investigación y ayuda a dar forma al periodo posminero. El equipo cuenta con expertos en minería, geología y geotecnología, ciencia de yacimientos minerales, hidrogeología, química, tecnología eléctrica y de la información, ciencia de los materiales, desarrollo urbanístico, topografía minera y economía, y todos trabajan en estrecha colaboración entre sí. Este es el núcleo en torno al que se ha establecido una red interdisciplinar en Alemania. La THGA de Bochum constituye el punto de partida perfecto a nivel geográfico y técnico para llevar a cabo la investigación en posminería.

Supervisamos y controlamos los procesos posmineros empleando métodos innovadores. Utilizamos datos de satélites, modelos 3D y sondas en aguas profundas, así como cartografía histórica. No solo identificamos los retos, sino también las oportunidades disponibles para la posminería, y nuestra actividad incluye el desarrollo de ideas para su posterior uso inteligente en antiguas localidades mineras.

En el proyecto de Knowledge Management («gestión de conocimiento» en español), recogemos, filtramos y evaluamos de forma sistemática todas las fuentes de información relacionadas con la posminería. Se han digitalizado ya multitud de medios (desde antiguos glosarios mineros hasta mapas históricos). De esta forma, estamos creando poco a poco una amplia base de datos técnica *online* en la que se podrá buscar en el futuro usando palabras clave.

El aspecto posminero suele ignorarse frecuentemente (aun siendo algo que influye tanto en nuestro medioambiente como en nuestra sociedad). Particularmente si se observa desde la perspectiva de la política económica, es un factor significativo que tiene un gran potencial futuro: solo puede asegurarse una economía circular y una estrategia de materias primas sostenibles si se presta la suficiente atención al escenario posminero desde el principio.

El propio Centro de Investigación Posminera produce estudios y publicaciones científicas muy reconocidos. Compartimos nuestros últimos hallazgos en conferencias y congresos nacionales e internacionales. Además, el Centro de Investigación Posminera organiza su propio simposio, es un miembro activo de grupos de trabajo y comités, y aconseja a importantes regiones sobre el cambio estructural. De esta manera, combinamos una de gestión de conocimiento integrada con visión de futuro: estamos transfiriendo nuestra experiencia y conocimiento a futuras generaciones y asumiendo una responsabilidad social.

2 Área de investigación: Tareas permanentes y gestión de aguas de mina



El Centro de Investigación Posminera es un lugar donde se desarrollan procesos innovadores con un foco en el agua como recurso natural y las llamadas «tareas permanentes». A través de nuestras investigaciones, hemos establecido una comprensión global del sistema hidrológico de antiguos entornos mineros para facilitar la gestión sostenible del agua de minas, las aguas subterráneas y las aguas superficiales. El conocimiento y la experiencia que hemos obtenido sobre la industria minera del carbón también puede transferirse a otros sectores mineros.

Las conocidas como *tareas permanentes* incluyen las tareas técnicas que surgieron tras la finalización de la actividad minera de carbón en las áreas del Ruhr, del Sarre y de Ibbenbüren. Como esto puede a veces ocurrir en un periodo de tiempo indefinido, nos referimos a ellas como tareas permanentes. Estas incluyen la gestión del agua de minas, el constante bombeo de aguas superficiales (creación de pólders) y la purificación del agua subterránea en lugares designados específicamente para ello. Todos estos procesos llevados a cabo continuamente se centran en el agua. También hay potencial para tareas similares a llevarse a cabo en otras cuencas mineras.

La gestión del agua de mina es un elemento clave en la minería y, por tanto, en la posminería. Tras la finalización de actividades mineras regulares, desde un punto de vista técnico, ya no es necesario mantener los pozos y minas subterráneas sin agua. Así, se permite que el agua suba de forma controlada. Esto se hace bastante lentamente a través de entradas naturales, como el agua subterránea y la filtración. Para prevenir que el agua de minas entre en contacto con los estratos superiores que contienen agua potable, se busca su rebombeo hasta cierto nivel. El Centro de Investigación Posminera ayuda a guiar estos procesos, investigando la base científica para la gestión a largo plazo del agua en los distritos del Ruhr, del Sarre y de Ibbenbüren.

Cientos de años de actividad minera intensiva han causado que se vaya hundiendo el terreno y bajando el nivel de la superficie, llevando a la formación de áreas situadas por debajo de esta (llamadas pólders). En estas áreas, algunos de los cauces no pueden seguir fluyendo libremente. Como resultado, las áreas por debajo del nivel de la superficie tienen que drenarse continuamente para prevenir la acumulación del agua en los ríos y lagos de estas cuencas cerradas artificialmente. Cada año se bombean alrededor de 800 millones de metros cúbicos de agua solo en el área del Ruhr.

El agua subterránea tiene que supervisarse y controlarse en emplazamientos especiales. Hay sustancias dañinas que pueden penetrar en el suelo de antiguas áreas industriales, especialmente en lugares donde había antes coquerías. Estas presentan un peligro potencial para el medioambiente y el agua subterránea, de forma que deben gestionarse, supervisarse y, en ocasiones, sanearse durante un periodo de tiempo indefinido. Analizamos los procesos en detalle para identificar soluciones específicas y conciliar las necesidades de las personas con las del medioambiente. Este es el único enfoque viable para una reestructuración lo más natural posible de la gestión de los recursos acuáticos de antiguas regiones mineras (incluso para futuras generaciones).

Mediante el uso de tecnologías de medición punteras, damos soporte a proyectos para elevar de manera controlada el agua subterránea de minas, un rol en el que también prestamos atención al análisis de datos y su interpretación. Para esto, nuestros científicos investigan los procesos complejos que tienen lugar en antiguos yacimientos mineros (como la permeabilidad de la roca y el caudal del agua). Usamos esta información para desarrollar modelos de ascenso del agua. Asimismo, también exploramos cómo el agua de mina y el metano se pueden utilizar para generar energía.

En los laboratorios del Centro de Investigación Posminera también se está trabajando en el desarrollo de nuevos métodos de purificación de agua. El objetivo consiste en desarrollar medidas que puedan usarse para minimizar los niveles de sustancias potencialmente dañinas en aguas de minas. En este contexto, estamos contribuyendo de forma vital a la protección de recursos naturales.

3 Área de investigación: Geomonitoreo en posminería



¿Cómo podemos observar y controlar el legado de la actividad minera? el área de investigación de geomonitoreo en posminería busca dar respuesta a esta esta pregunta. El Centro de Investigación Posminera desarrolla tecnologías y métodos perfectamente a medida para el seguimiento de actividades posmineras. Nuestros investigadores recogen y combinan una diversa gama de (geo)información y la utilizan como base para desarrollar modelos 3D integrados. Estas técnicas pueden utilizarse para detectar emisiones de gas metano, cavidades cerca de la superficie, movimientos de suelo y cambios en el medioambiente. El propósito a largo plazo de nuestra innovación es simular digitalmente procesos potenciales y crear un sistema de gestión de riesgos viable para la fase posminera.

La posminería es un gran puzzle: a través de la ciencia del geomonitoreo, empleamos datos recogidos desde el espacio, en la superficie terrestre o en el subsuelo, para transferirlos desde el pasado al futuro y construir una imagen integrada por todas las piezas.

4 Área de investigación: Ciencia de materiales para preservar el legado industrial



La cultura industrial es como el caballo de Troya: hermosa desde fuera, pero tras la que se esconde el peligro. Al mirar los castilletes de acero, no resulta frecuentemente obvio si el material bajo la superficie está deteriorándose o no. Pero no todo se puede preservar. El precio por salvar algo puede, sin duda alguna, sobrepasar su valor intangible.

Investigamos los procesos de envejecimiento de los metales y materiales sintéticos, y aplicamos nuestros descubrimientos para preservar la cultura industrial (incluyendo minas de carbón abandonadas, fábricas de coque, altos hornos, distintas máquinas y equipamientos hechos de una gran variedad de materiales y combinaciones de sustancias). Los estados de la materia se analizan registrando las influencias del medioambiente y desarrollando nuevas técnicas de investigación. En el mejor de los casos, el proceso de deterioro no solamente se retrasará, sino que se parará por completo. A través de esta área de investigación se puede ver al Centro de Investigación Posminera trabajar de cerca con los científicos de materiales del Deutsches Bergbau-Museum («museo minero alemán» en español) de Bochum.

5 Área de investigación: Reactivación y transición



Queremos hacer que las antiguas regiones mineras sirvan para el futuro, pero ¿cómo podríamos planificar esta transformación? En el Centro de Investigación Posminera analizamos los marcos políticos, económicos y legales necesarios para reactivar con éxito antiguos emplazamientos industriales y sus infraestructuras. Al hacerlo, tenemos en cuenta objetivos re-

gionales y municipales, así como la implicación del público general. De esta manera, sentamos las bases para establecer nuevos distritos residenciales, parques empresariales, zonas recreativas o instalaciones de energías renovables en lugares donde se extraían materias primas a través de la actividad minera.

Nuestras actividades se dirigen especialmente a organizaciones y asociaciones que trabajan el cambio estructural, estando aquí incluidas las ciudades, los municipios, las autoridades públicas y la UE. Nuestra experiencia puede también beneficiar a otros países que se enfrenten a tareas similares en el futuro.

6 ¿Estudiar posminería?

El programa de máster de la THGA de Geotechnical Engineering and Post-Mining («ingeniería geotécnica y en posminería» en español) se ha diseñado para enseñar a ingenieros sobre como lidiar responsablemente con el legado minero. El curso combina las ciencias naturales y la tecnología, y da al alumnado los conocimientos prácticos necesarios para tareas futuras relacionadas con la posminería. Ya hay una alta demanda de especialistas de esta área, y seguirá creciendo también a nivel internacional.

El Centro de Investigación Posminera es un experto, un socio independiente para autoridades regionales, municipios, empresas, agencias públicas, instituciones políticas y organizaciones científicas comprometidas con la gestión de las consecuencias de las actividades mineras. Con nuestro laboratorio geotecnológico y de posminería, estamos perfectamente equipados para realizar análisis y pruebas sobre el terreno (desde estudios de mecánica de suelos hasta estudios de hidroquímica). También organizamos nuestros propios talleres sobre posminería. En estos, nuestros expertos colaboran de forma multidisciplinaria entre sí, manteniendo el mismo foco en los aspectos técnicos y las cuestiones socioeconómicas.

7 Conclusión

El Centro de Investigación Posminera es un socio competente para todas las áreas de posminería al agrupar e integrar diferentes conocimientos, experiencias, competencias y habilidades. El conocimiento existente y en constante desarrollo se divulga y se hace accesible a lo largo de todo el mundo, siendo este importante para muchas regiones mineras. Para esta tarea, el Centro de Investigación Posminera ya está trabajando en proyectos y programas de formación para empresas y ejecutivos del sector minero en el extranjero.

Publicado por primera vez en: Kretschmann, J.; Goerke-Mallet, P.; Melchers, C. (ed.) (2020): *Done for Good 2.0. Results in Post-Mining Research. A Compilation by the Research Center of Post-Mining TH Georg Agricola University.* Bochum: Selbstverlag der Technischen Hochschule Georg Agricola. pp. 341-346.

ISBN: 978-3-949115-05-9
www.post-mining.org

