DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y MINERA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA
DETERMINACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE
OPERACIONES EXTRACTIVAS DE RECURSOS MINERALES
POR MEDIO DE MODELOS COMPARATIVOS Y EL
ESTABLECIMIENTO DE CRITERIOS DINÁMICOS COMO
HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN**

TESIS DOCTORAL

Autor: JORGE CASTILLA GÓMEZ
Ingeniero de Minas

Director: JUAN HERRERA HERBERT
Dr. Ingeniero de Minas

2014

Fotografía de portada: Adelaide Hills Quarry

Por cortesía de Ersu, www.flickr.com/photos/ersu99/, bajo Licencia Creative Commons

*A Lucía y a María, porque
se lo merecen todo y más.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer al Dr. Juan Herrera Herbert, Director de esta Tesis Doctoral, su dedicación, apoyo y asesoramiento desde la concepción de la misma hasta su conclusión.

Del mismo modo quisiera agradecer al Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, el haber puesto a mi disposición todos los medios necesarios para el desarrollo de la Tesis y la difusión de los resultados obtenidos a lo largo de la misma. Dentro del Departamento quisiera agradecer especialmente a aquellos que han preguntado incansablemente sobre su desarrollo, con ánimo de evitar la dispersión y el desánimo. Quisiera incluir aquí a aquellas personas de la Escuela que han brindado su apoyo incondicional desde hace muchos años y que son y serán, más que nada, Amigos.

A mis padres, que siempre han estado ahí, apoyándome en mis decisiones y han sabido dar el consejo necesario en cada momento.

A mis hermanos, con los que he compartido tanto y que siempre me han ayudado y han dado tantos y tan buenos consejos. Con los que siempre se ven más cerca las estrellas.

Al resto de mi familia, por hacerme saber que siempre están cuando se les necesita.

A mis amigos, a todos, que no enumero para no olvidarme de ninguno, que a pesar de habernos visto menos sé que siempre están ahí. Ahora espero poder devolverles muchas visitas.

A Lucía, compañera de todo, que sin su apoyo continuo en todos los sentidos no hubiera sido posible haber llegado hasta este punto.

A María, que es capaz de hacer que uno se olvide de todo solo con una sonrisa.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	3
PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL.....	5
1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS Y ALCANCE	11
3. ANTECEDENTES	13
3.1. Evaluación del Riesgo Ambiental y del Impacto Ambiental	14
3.1.1. Fases de la Evaluación de Impacto Ambiental	16
3.2. Análisis de Riesgos Ambientales aplicado a las actividades mineras.....	18
3.3. El Análisis del Ciclo de Vida como herramienta de análisis.	20
3.4. Marco legislativo	22
3.4.1. Directiva 2004/35/CE	23
3.4.2. Ley 26/2007. Ley de Responsabilidad Medioambiental	25
3.4.3. Ley 11/2014, por la que se modifica la ley 26/2007, de Responsabilidad Medioambiental.....	27
3.4.4. R. D. 2090/2008. Desarrollo de la Ley de Responsabilidad Medioambiental.	27
3.4.5. Informes MIRAT.....	30
3.4.6. R. D. 975/2009. Normativa sobre residuos de industrias extractivas.....	31
3.4.7. Ley 22/2011. Ley de residuos y suelos contaminados.	33
3.4.8. Ley 21/2013. Ley de Evaluación ambiental	35
3.4.9. Normas UNE	37
3.5. Aplicación de la Normativa al desarrollo de las actividades mineras	61
3.6. Dificultades de aplicación de la Legislación. Falta de criterios de comparación	64
3.7. Potenciales impactos ambientales en las operaciones mineras.....	68
3.7.1. Geomorfología y paisaje.....	69

3.7.2.	Subsidencia.....	72
3.7.3.	Afección a los cursos del agua.....	74
3.7.4.	Calidad del aire. Emisiones y generación de polvo.	76
3.7.5.	Consumo de energía	81
3.7.6.	Ruido	84
3.7.7.	Efectos de las operaciones de voladura: Vibraciones, Ruido y Onda aérea.	92
3.7.8.	Generación de árboles de fallos para la gestión de efectos ambientales generados por voladuras.....	103
3.7.9.	Residuos	108
3.7.10.	Drenaje de aguas ácidas de mina.....	109
4.	METODOLOGÍA.....	115
4.1.	Evaluación del impacto ambiental en minería. Técnicas aplicables	115
4.1.1.	Técnicas aplicables	118
4.2.	Nuevo paradigma del análisis ambiental	119
4.2.1.	La explotación minera como fuente de impacto ambiental.	122
4.3.	Establecimiento de Indicadores	123
4.3.1.	Indicadores generales	125
4.3.2.	Indicadores específicos	127
4.4.	Modelos dinámicos de impacto ambiental.....	135
4.4.1.	Modelo dinámico de impacto ambiental estructural	138
4.4.2.	Modelo dinámico de impacto ambiental coyuntural.....	143
4.5.	Factores de ponderación y nivel de impacto global	144
4.6.	Influencia de los indicadores en la planificación minera	147
5.	RESULTADOS	149
5.1.	Aplicación al caso de estudio	149
5.1.1.	Determinación de la zona sensible	151

5.1.2.	Indicadores generales	152
5.1.3.	Indicadores específicos	152
5.1.4.	Resumen de indicadores	166
5.1.5.	Modelos dinámicos	166
5.1.6.	Nivel de impacto ambiental	170
5.2.	Incertidumbres de la metodología	174
6.	CONCLUSIONES	177
7.	REFERENCIAS	181

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de gestión y control centralizado de operaciones.....	8
Figura 2: Aspectos que intervienen en las practicas mineras sostenibles.	10
Figura 3: Procedimientos en la evaluación de componentes ambientales.....	18
Figura 4: Implicaciones ambientales de la Minería.....	19
Figura 5: Marco de trabajo del Análisis de Ciclo de Vida	21
Figura 6: Contribución de la apreciación del riesgo al proceso de gestión del riesgo	39
Figura 7: Proceso iterativo para identificar, evaluar y gestionar el riesgo ambiental	44
Figura 8: Costes ambientales	49
Figura 9: Marco conceptual de la Norma UNE 150011.2005.....	50
Figura 10: Modelo de sistema de gestión minera sostenible	52
Figura 11: Etapas de un Análisis de Ciclo de Vida	58
Figura 12: Marco conceptual de los impactos acumulativos en Minería	66
Figura 13: Afección de varios proyectos mineros sobre un mismo área sensible	67
Figura 14: Afección de varios proyectos mineros sobre un mismo área sensible pertenecientes a diferentes países	67
Figura 15: Impactos de las labores mineras y sus residuos en las aguas subterráneas y superficiales	75
Figura 16: Energía necesaria (GER) para la producción de metales primarios	82
Figura 17: Niveles de sonido típicos asociados con maquinaria de minería de superficie	85
Figura 18: Diagrama de trabajo para la estimación del nivel de ruido en explotaciones mineras	88
Figura 19: Ajuste debido a la absorción del sonido en el terreno	89
Figura 20: Efecto de apantallamiento debido a una barrera	90
Figura 21: Efectos ambientales asociados a las operaciones de voladura.....	92
Figura 22: Tipos de ondas sísmicas	95

Figura 23: Casos de posible riesgo de proyecciones	100
Figura 24: Estimación del alcance de las proyecciones.....	101
Figura 25: : Códigos empleados en los árboles de fallos	104
Figura 26: Vibraciones. Árbol de fallos.....	105
Figura 27: Proyecciones. Árbol de fallos	106
Figura 28: Onda aérea. Árbol de fallos.....	107
Figura 29: Efectos más importantes del drenaje ácido de mina.....	112
Figura 30: Relación entre fases y toma de decisiones en el desarrollo de un proyecto minero	116
Figura 31: Relación entre Evaluación ambiental y el ciclo de un proyecto minero	117
Figura 32: Aspectos que intervienen en la selección del método de explotación [60]	120
Figura 33: Análisis ambiental centrado en las fuentes generadoras de impacto ambiental....	120
Figura 34: Análisis ambiental centrado en las áreas receptoras de impacto ambiental	121
Figura 35: Análisis ambiental clásico (a) y análisis propuesto (b)	123
Figura 36: Modelo cualitativo de cambios en el paisaje en función de la fase del proyecto minero	136
Figura 37: Modelo dinámico de impacto ambiental sobre el paisaje	139
Figura 38: Modelo dinámico de impacto ambiental de la subsidencia.....	140
Figura 39: Modelo dinámico de impacto de la desviación de los cursos de agua	141
Figura 40: Modelo dinámico de impacto ambiental de la generación de residuos.....	142
Figura 41: Modelo dinámico de impacto ambiental del drenaje ácido	143
Figura 42: Modelo dinámico de impactos ambientales coyunturales	144
Figura 43: Secuencia para la modelización cuantitativa de impactos ambientales.....	145
Figura 44: Nivel del impacto ambiental vs. Tiempo.....	148
Figura 45: Ubicación del caso de estudio.....	149
Figura 46: Detalle de la ubicación del caso de estudio.	150

Figura 47: Detalle de la ubicación del punto objetivo.	151
Figura 48: Zona de Estudio Cantera.	154
Figura 49: Zona de Estudio Mina.....	155
Figura 50: Zona de Estudio Mina (2003).	155
Figura 51: Zona de Estudio Cantera (2003).....	156
Figura 52: Ubicación de los perfiles topográficos del Caso de Estudio.....	160
Figura 53: Perfil Topográfico Punto Objetivo-Cantera.....	161
Figura 54: Perfil Topográfico Punto Objetivo-Mina	162
Figura 55: Comparación de indicadores normalizados. Caso de Estudio	169
Figura 56: Comparación de indicadores normalizados. Caso de Estudio (Continuación).....	170
Figura 57: Carácter dinámico del nivel de impacto ambiental. Caso de Estudio.....	172
Figura 58: Nivel de impacto ambiental total. Caso de Estudio	173
Figura 59: Nivel de Impacto Ambiental total. Explotaciones con desfase.....	174

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Aplicabilidad de las herramientas utilizadas para la apreciación del riesgo	43
Tabla 2: Temática de los requisitos del Sistema de Gestión Minera Sostenible	53
Tabla 3: Tipos de indicadores y parámetros propuestos en la Norma UNE 22470:2008	55
Tabla 4: Tipos de indicadores y parámetros propuestos en la Norma UNE 22470:2008 (Continuación).....	56
Tabla 5: Consideraciones sobre la subsidencia de varios métodos de explotación	74
Tabla 6: Consumo de energía global y generación de gases de efecto invernadero	79
Tabla 7: Fórmulas empíricas de ratios de emisión en función de la actividad	80
Tabla 8: Generación de gases de efecto invernadero en canteras	81
Tabla 9: Consumo medio de diesel en grandes minas a cielo abierto de todo el mundo	82
Tabla 10: Consumo de energía en función del tipo de energía y la operación.....	83
Tabla 11: Indicadores específicos para los ratios de emisión de polvo	129
Tabla 12: Valoración del efecto por subsidencia	131
Tabla 13: Distribución cualitativa de impacto en función del nivel de actividad.....	136
Tabla 14 : Magnitudes para diversos factores de impacto	146
Tabla 15: Coordenadas áreas de estudio	153
Tabla 16: Emisión de polvo en el caso de estudio.....	158
Tabla 17: Parámetros empleados en el cálculo de las emisiones	159
Tabla 18: Valores estándar de emisión para el equipamiento de Cantera	161
Tabla 19: Valores estándar de emisión para el equipamiento de Mina	162
Tabla 20: Predicción de vibraciones en el área de estudio	163
Tabla 21: Valores del indicador Evol para el caso de estudio	164
Tabla 22: consumo de energía para las explotaciones objeto de estudio	165
Tabla 23: Generación de CO ₂ en el caso de estudio.....	165
Tabla 24: Resumen de indicadores. Caso de Estudio	166

Tabla 25: Duración temporal de las fases de los proyectos del caso de estudio.....	167
Tabla 26: Indicadores Normalizados. Caso de Estudio.....	168
Tabla 27: Factores de ponderación. Caso de Estudio	171

RESUMEN

La explotación de recursos minerales es una actividad imprescindible para el desarrollo de la sociedad actual. La calidad de vida y el desarrollo económico y social de las sociedades humanas actuales depende de una intensa, y continua producción de una amplia y variada gama de minerales para poder cubrir sus necesidades. Estas necesidades de producción, junto con la necesidad de asegurar el nivel de protección del medio ambiente, hacen necesario que las explotaciones mineras tengan que ser gestionadas bajo diferentes puntos de vista que se fusionan bajo la idea de la Sostenibilidad.

Para asegurar una protección del Medio Ambiente que sea efectiva, existe un amplio abanico de técnicas y herramientas entre las que destaca la Evaluación de Impacto Ambiental, que es una de las más ampliamente empleadas y aceptadas, tanto por la industria como por los organismos reguladores. Esta herramienta presenta muchas ventajas para la adecuada gestión de los impactos ambientales producidos por un determinado proyecto, pero también adolece de desventajas, debidas en gran medida a la aplicación de criterios e indicadores de carácter subjetivo. Por este motivo y, bajo determinadas condiciones, resulta difícil establecer comparaciones entre explotaciones mineras como forma de poder estimar las potenciales cargas ambientales que cada una puede llegar a generar.

El desarrollo de esta Tesis Doctoral trata de contribuir a la mejora del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental cuando lo que se analizan son precisamente el caso singular de las explotaciones mineras, estableciendo para ello una metodología de trabajo basada en la aplicación de modelos comparativos y cuantificables que sean de aplicación en el proceso de gestión ambiental de una o varias explotaciones, aportando mayor información a la gestión de los impactos acumulativos en una determinada región. El punto de vista empleado en su desarrollo ha estado basado en la premisa de la búsqueda de indicadores que puedan establecerse de modo previo al comienzo de la explotación.

Además, esta Tesis Doctoral contribuye de igual forma a la representación de la evolución en el tiempo de los impactos ambientales de las explotaciones mineras, aspecto que no queda cubierto con los métodos de evaluación ambiental clásicos habitualmente empleados. Esto permite además disponer de una mayor información para la adopción de medidas mitigadoras proporcionales en cada momento a las potenciales cargas ambientales, y todo ello en función de la situación del proyecto desarrollado.

Para ilustrar la contribución de la metodología desarrollada se ha llevado a cabo la aplicación de la misma a un caso de estudio en el cual se han escogido dos explotaciones diferentes situadas en una misma área para establecer el potencial impacto de cada una sobre un punto determinado.

ABSTRACT

The production of mineral resources is an essential activity for the development of modern society. Furthermore, industry tackles the need to maintain a high ratio of mineral production to meet the needs of society. This required production with the need to ensure the level of protection of the environment makes it necessary that mining operations have to be managed under different points of view merged under the idea of sustainability.

To ensure an effective protection of the environment there is a wide range of techniques and tools, such as the Environmental Impact Assessment, which is one of the most widely used and accepted tools both by industry and by regulators. This tool has many advantages for the proper management of environmental impacts caused by a project, but also has many disadvantages, largely due to the application of certain criteria and indicators sometimes with subjective views. Therefore, under certain conditions it is difficult to make comparisons between mining operations to estimate potential environmental charges that each can generate.

The development of this Thesis is focused to contribute to improving the process of Environmental Impact Assessment, establishing a methodology based on the application of comparative and quantifiable models that could be applied in the process of environmental management of one or more mining operations, providing more information to the management of cumulative impacts in a specific region. The point of view used in its development has been based on the premise of finding indicators that may be established prior to the starting of the project.

In addition, this Thesis contributes equally to the representation of the evolution with time of the environmental impacts of mining operations, issue that is not completely covered by the classical environmental assessment methods and it contributes to provide information for the adopting of mitigation measures to potential environmental loads, depending on the status of the project developed.

To illustrate the contribution of the developed methodology a case study has been carried out in which two different mining operations located in the same area have been selected, to establish the potential environmental impact of each on a certain point.

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL

Los resultados de la presente Tesis Doctoral han sido publicados en los siguientes Congresos Internacionales.

Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., **"Environmental analysis of mining operations: dynamic tools for impact assessment"**, Conference on Sustainability through Resource Conservation and Recycling '14 (SRCR14), Falmouth, Reino Unido, 2014, MEI-Minerals Engineering International.

Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., Qinglong Z., **"Noise pollution in mining operations: Prediction of noise impact on environment caused by mining machinery"**, 14th SGEM Geoconference on Ecology, Economics, Education and Legislation, Albena, Bulgaria, 2014, pp. 481-488, ISBN: 9786197105179, DOI: 10.5593/sgem2014B51.

Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., **"Comparative Criteria for a Dynamic Approach to Environmental Impact Assessment and Its Influence in Mine Planning"**, Mine Planning and Equipment Selection, Dresden Alemania, Eds. Drebenstedt C. and Singhal R., Springer International Publishing, 2014, pp. 685-696, DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_66.

Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., **"Comparative criteria for environmental risk assessment in mining operations: A dynamic approach"** in 13th SGEM Geoconference on Ecology, Economics, Education and Legislation, Albena, Bulgaria, 2013, pp. 205-212, ISBN: 9786197105049, DOI: DOI: 10.5593/SGEM2013/BE5.V1/S20.028.

Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., **"Environmental risk assessment in open pit blasting operations: Compliance with ISO 31010"** in 22nd World Mining Congress & Expo, Estambul, Turquía, 2011, ISBN: 9786050101461.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la sociedad actual está basado en la necesidad de cubrir una creciente demanda de bienes y servicios de modo que la industria se ve obligada a evolucionar y adaptarse para ser capaz de proporcionar y poner en el mercado dichos productos [1]. En esta cadena de necesidades el primer escalón industrial es el suministro de materias primas para su posterior procesamiento y transformación. Esta acción de cubrir las necesidades de la sociedad se ha desarrollado desde siempre [2]. De hecho, la industria minera (como conjunto de todos los tipos de actividades extractivas de recursos minerales), tiene un enorme peso y pujanza en la economía mundial, ocupando una posición vital en la cadena de suministro de materias primas.

Esta necesidad se ve influenciada por una imparable industrialización y el continuo crecimiento de núcleos poblacionales y las ciudades, consecuencia a su vez de la migración de las poblaciones rurales a las ciudades y, a la vez, el propio crecimiento de las ciudades, que son cada vez más grandes [3]. Este hecho hace que sea necesaria la construcción de nuevas infraestructuras y que los habitantes de esos núcleos demanden unos nuevos bienes de consumo. Así, suele decirse que sin la actividad minera (en el amplio sentido del término), no es posible alcanzar el nivel de desarrollo y calidad de vida demandado por la sociedad [3-6].

El término “industria minera” es un término muy amplio que incluye todas las actividades necesarias para buscar, investigar y extraer minerales y procesarlos posteriormente para obtener un producto mineral comercializable con un mayor o menor grado de elaboración. En algunos casos, todo este proceso está integrado en la misma instalación, siendo gestionado por una misma empresa, aunque en otros casos, estas actividades están dispersas y son empresas diferentes las que efectúan cada uno de los procesos unitarios. Este aspecto hace que las ventajas tecnológicas y tecnologías aplicables sean diferentes [7].

La industria minera se enfrenta a una serie de retos que hacen que sea necesario que se esté colocada en una posición de liderazgo en cuanto a desarrollo tecnológico e innovación.

Así, la evolución de las operaciones mineras hace necesaria una evolución de los sistemas implementados de modo que puedan hacer frente a la extracción de minerales con contenido mineral cada vez menor, con profundidades cada vez mayores y además, se deberán hacer frente a distancias de transporte cada vez más largas.

La evolución de los sistemas y métodos pasa por una mejora del control de los procesos, basados en disminuir la variabilidad, mejorar la eficiencia de la programación de los trabajos e identificar de manera anticipada los “cuellos de botella” del sistema.

Otro factor clave para el mantenimiento de la competitividad del sector es la necesidad de la optimización del consumo de energía siendo necesario, además, el uso de energías alternativas y renovables.

La optimización y el continuo desarrollo del control de los procesos hacen posible, incluso, el desarrollo de sistemas autónomos capaces de adaptar las condiciones operativas en función de las necesidades establecidas. Así, existen desarrollos de proyectos mineros con operaciones autónomas de transporte de mineral, bien en volquetes dentro de la operación minera, bien en ferrocarriles en transporte a largas distancias, incluyendo su carga y descarga a distancia. Igualmente, existen desarrollos de sistemas automáticos en las operaciones de perforación. El control de estos procesos se realiza en centros de operación situados a miles de kilómetros (Figura 1).

El aumento de productividad logrado con estos modelos de control, revierte en el ciclo minero en forma de una mejora de la seguridad y productividad de los trabajadores, mejora en las tasas de recuperación de mineral, reducción en la generación de residuos, optimización en el uso de la energía, mejoras en la investigación de nuevos yacimientos y mejoras en la recuperación de yacimientos de geometría y composición compleja.

Figura 1: Modelo de gestión y control centralizado de operaciones. Traducido de [8]

De este modo, puede decirse de modo general, que los avances tecnológicos en los que está inmersa la industria minera tienen como horizonte común el aumento de la productividad, una disminución de los costes de extracción, un incremento de la seguridad y un respeto por el medio ambiente.

En este último aspecto, la minería se enfrenta a quizá uno de los retos más grandes que pueden presentarse en una actividad industrial que es la extracción de los minerales de la corteza terrestre, sin perjudicar ni comprometer el medio ambiente ni efectuar impactos negativos permanentes en la zona de actuación. De este modo surge la necesaria adaptación del concepto del “desarrollo sostenible” a la minería. Según La Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas, definió el desarrollo sostenible como “el desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para enfrentarse a sus propias necesidades” [9].

Según este planteamiento el desarrollo sostenible tiene que conseguir a la vez: satisfacer a las necesidades del presente, fomentando una actividad económica que suministre los bienes necesarios a toda la población mundial y satisfacer a las necesidades del futuro, reduciendo al mínimo los efectos negativos de la actividad económica, tanto en el consumo de recursos como en la generación de residuos, de tal forma que sean soportables por las próximas generaciones.

El desarrollo sostenible en minería no es fácilmente alcanzable y una integración temprana de la sostenibilidad en el diseño de los proyectos industriales, incluyendo la minería, es un factor clave para ofrecer un gran potencial para la reducción de los riesgos asociados a un proyecto [10, 11].

Desde el punto de vista de la minería, la sostenibilidad significa que los valores medioambientales no deben perderse o degradarse de forma continuada, permanente e/o irreversible. En la práctica, se asume que en un proyecto minero esta posición se alcanza en las etapas de rehabilitación y restauración, lo que resulta en una falsa sostenibilidad y un rechazo frontal. La sostenibilidad significa más que eso y existen otros aspectos que deben ser considerados en la evaluación de la sostenibilidad [12].

Las prácticas para un desarrollo sostenible en minería se han convertido en parte íntegra del negocio de las empresas mineras. Sin embargo, la historia de prácticas mineras inadecuadas, los pasivos ambientales dejados y los impactos negativos producidos hasta un pasado reciente, han hecho que las actividades mineras futuras sean juzgadas bajo la sombra de las malas prácticas llevadas a cabo o por operadores mineros técnicamente poco solventes [13].

Así, puede decirse que la adopción de prácticas mineras sostenibles pasa por la integración de aspectos económicos, medioambientales, sociales, de seguridad y eficiencia [14](Figura 2).

Figura 2: Aspectos que intervienen en las practicas mineras sostenibles. Adaptado de [14]

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

El marco metodológico propuesto en esta Tesis Doctoral intenta contribuir al proceso de evaluación de impacto ambiental ofreciendo un punto de vista innovador, de modo que el proceso estándar de evaluación se vea complementado con herramientas que hagan posible una comparación de las metodologías establecidas para la determinación del impacto ambiental de áreas afectadas por diversas actividades mineras.

Para llevar a cabo esta metodología el desarrollo de la Tesis pasa por establecer los tipos de explotaciones donde la misma sea de aplicación, tratando en todo momento de generalizar los conceptos presentados para poder así servir como herramienta de aplicación general.

Por otro lado se plantea la identificación de los potenciales impactos que las explotaciones mineras pueden llegar a producir en el medio ambiente y se presentan aquellos métodos de cálculo, bien empíricos o experimentales, bien teóricos, que pueden expresar una estimación de cada uno de los impactos que representan.

Asimismo se hace una descripción de la estandarización del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental ampliando su campo de aplicación mediante el establecimiento de indicadores objetivos basados en datos operativos.

En el caso de que haya parámetros dependientes en demasía de las condiciones particulares de cada explotación y que no sean fácilmente extrapolables a otras operaciones se tratará de establecer otros indicadores que aunque pueden ser indicadores más simplificados, se valorará su capacidad de adaptación a otras explotaciones.

Una vez establecidos los indicadores necesarios, se elaborará una modelización de la evolución de los parámetros en el tiempo, relacionando el nivel de afección ambiental con las etapas del proyecto minero. De este modo se pretende establecer un modelo dinámico de impacto ambiental que represente la evolución de los impactos ambientales en función de las etapas operativas de un proyecto de explotación minera.

Cuando se hayan determinado los indicadores y los modelos dinámicos de impacto ambiental se aplicará la metodología desarrollada a un caso de estudio.

3. ANTECEDENTES

El crecimiento de la preocupación medioambiental, además de la globalización y la liberalización de procesos ha estimulado el desarrollo de herramientas de gestión, instrumentos para mejorar los procesos de toma de decisiones, así como cambios en el comportamiento, con el objetivo general de mejorar la protección medioambiental de la industria [15].

Entre las herramientas desarrolladas, el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) se ha establecido como herramienta de referencia global y ha sido complementada con otras técnicas de evaluación específicas para ciertos casos. Estas otras herramientas también pueden ser usadas como técnicas independientes, sin integrarse en el EIA general de un proyecto determinado. Una vez que la sostenibilidad requiere la integración del medio ambiente en el proceso de toma de decisiones, las políticas empresariales se están viendo obligadas a establecer evaluaciones estratégicas de impactos ambientales, para alinear el negocio empresarial con los objetivos del medio ambiente [15, 16].

Las herramientas desarrolladas para el análisis y gestión ambiental en minería, entre otras, pueden ser las siguientes [15, 17-22]:

- Análisis coste-beneficio.
- Auditorías medioambientales.
- Estudios de Impacto Ambiental (EIA)
- Análisis de Ciclo de Vida (ACV)
- Evaluación ambiental estratégica.
- Indicadores de desarrollo sostenible.

El alcance de las herramientas medioambientales disponibles ha dado lugar a confusiones en sus resultados y aplicaciones, así como a quién debería realizarlos. Un Director de Proyecto no puede ser un experto en todas las técnicas y el desafío pasa por hacer un uso racional de las mismas. Sin embargo, cuando las herramientas se han incorporado a normativa y leyes nacionales surge la idea errónea de que se trata de herramientas "gubernamentales", en lugar de una ayuda en la toma de decisiones corporativas [15].

Por lo tanto, la auditoría ambiental, evaluación del ciclo de vida, evaluación de riesgos, evaluación del impacto ambiental y, más recientemente, el análisis ambiental estratégico, junto con las normas de sistemas de gestión ambiental han sido poco a poco adoptadas como procedimientos de aplicación normal y habitual en la industria [15].

3.1. Evaluación del Riesgo Ambiental y del Impacto Ambiental

La evaluación ambiental resulta indispensable para la protección del medio ambiente. Facilita la incorporación de los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones estratégicas a través de la evaluación de los planes y programas. Y, a través de la evaluación de proyectos, garantiza una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que se puedan generar al tiempo que establece mecanismos eficaces de corrección o compensación [23]. De este modo, a través de una correcta identificación de los parámetros que intervienen en la generación de impacto ambiental, se puede establecer el primer paso para la correcta gestión del riesgo ambiental.

Si bien hay muchas definiciones de la palabra riesgo, puede decirse que el riesgo ambiental es la potencial generación de efectos nocivos para la salud humana o para los sistemas ecológicos que resultan de la exposición a un factor de estrés ambiental. Los factores de estrés pueden afectar negativamente a recursos naturales específicos o bien a ecosistemas enteros, incluyendo plantas y animales, así como el entorno con el cual interactúan [24].

Por otro lado, el riesgo ambiental puede también definirse como el resultado de una función que relaciona la probabilidad de ocurrencia de un determinado escenario de accidente y las consecuencias negativas del mismo sobre el entorno natural, humano y socioeconómico [25].

Estas consecuencias negativas sobre el medio ambiente pueden identificarse como “impacto ambiental”, que se puede definir como cualquier cambio en el medio ambiente, sea adverso o beneficioso, resultante en todo o en parte de las acciones derivadas de las diferentes fases de construcción, explotación, mantenimiento y, en su caso, clausura, cese o desmantelamiento de la actividad objeto del proyecto. El cambio se mide por la variación del estado de los factores ambientales a lo largo del tiempo, con o sin el proyecto [26]. Las cargas ambientales generadas pueden ser reversibles o irreversibles, temporales o permanentes y suelen estar relacionadas con la actividad del proyecto.

Puede decirse que una evaluación de riesgo ambiental es un proceso estandarizado ampliamente reconocido y aceptado por los organismos reguladores. Es una herramienta para identificar cómo una determinada actividad puede influir en la calidad de vida de las personas y el medio ambiente. El proceso de evaluación de riesgos ambientales puede ser usado para priorizar acciones o para servir de guía en la toma de decisiones sobre temas de remediación y seguimiento ambiental. También puede usarse para comparar el coste y el beneficio de varias opciones de actuación posibles, ayudando a la compañía a entender y gestionar su responsabilidad sobre la actividad realizada en un lugar [27].

El desarrollo del Estudio de Impacto Ambiental debe ser visto como el fomento de la precaución en la medida en que ofrece un mecanismo para anticipar los riesgos ambientales graves e irreversibles derivados de los proyectos de desarrollo, y teniendo en cuenta las medidas necesarias para evitarlos o mitigarlos en medida de lo posible [28].

De este modo la determinación del riesgo ambiental pasa por la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental, para identificar los posibles efectos ambientales de un proyecto, y cómo estos impactos pueden gestionarse para reducir su acción en el medio que lo rodea.

La predicción de impactos ambientales debe incluir la evaluación de diferentes tipos de impactos [17], en función de su origen y duración en el tiempo:

- Impactos directos (o primarios): aquellos ocasionados por el desarrollo de un proyecto.
- Impactos indirectos (o secundarios): aquellos efectos “rebote” ocasionados por los impactos primarios, bien en la misma ubicación del proyecto objeto de estudio, bien en ubicación diferente resultado de una cadena de causa-efecto más o menos compleja.
- Impactos acumulativos: que se acumulan con el tiempo a partir de un número de proyectos o actividades y a los que contribuye el nuevo proyecto desarrollado. También se suelen llamar “efectos combinados”.

El proceso de Evaluación de Impacto Ambiental es un procedimiento interdisciplinario de múltiples pasos que sirve para asegurar que las consideraciones ambientales han sido tomadas en cuenta en las decisiones relativas a los proyectos que pueden tener un impacto en el medio ambiente [29].

Los procedimientos de evaluación ambiental se sujetarán a los siguientes principios [23]:

- Protección y mejora del medio ambiente.
- Precaución.
- Acción preventiva y cautelar, corrección y compensación de los impactos sobre el medio ambiente.
- Quien contamina paga.
- Racionalización, simplificación y concertación de los procedimientos de evaluación ambiental.
- Cooperación y coordinación entre la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas.
- Proporcionalidad entre los efectos sobre el medio ambiente de los planes, programas y proyectos, y el tipo de procedimiento de evaluación al que en su caso deban someterse.
- Colaboración activa de los distintos órganos administrativos que intervienen en el procedimiento de evaluación, facilitando la información necesaria que se les requiera.
- Participación pública.
- Desarrollo sostenible.
- Integración de los aspectos ambientales en la toma de decisiones.
- Actuación de acuerdo al mejor conocimiento científico posible.

Los beneficios de la realización de la Evaluación de Impacto Ambiental son, entre otros:

- Potencialmente filtra proyectos ambientalmente inapropiados.
- Propone diseños modificados a fin de reducir impactos ambientales.
- Identifica las alternativas ambientalmente más factibles.
- Predice los efectos significativos adversos de proyectos potenciales.
- Identifica las medidas de mitigación para evitar, reducir o contrarrestar impactos mayores.
- Compromete e informa a las comunidades e individuos potencialmente afectados.
- Influye la toma de decisiones y el desarrollo de los términos y condiciones.

Puede decirse que existe una serie de diferencias a la hora de concebir la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) y la Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA). Estas diferencias pasan por entender el EIA como la determinación de impactos que son aceptables en mayor o menor medida, mientras que el ERA se posiciona como una herramienta para prevenir accidentes identificando los procesos iniciadores de los mismos [22]. Por ejemplo, el EIA puede evaluar el impacto que genera la construcción de una presa de residuos, y el ERA se cuestiona qué pasaría en caso de rotura de esa misma presa.

3.1.1. Fases de la Evaluación de Impacto Ambiental

En todo Estudio de Impacto Ambiental existen una serie de fases a tener en cuenta para abordar un Estudio de Impacto Ambiental de manera correcta. Si asumimos que el desarrollo del EIA se realiza cuando se ha realizado el estudio de viabilidad del proyecto, los procedimientos que tendrán que seguirse y que deben estar incluidos en el Estudio de evaluación de impacto ambiental serán [17, 23] (Figura 3):

- Alcance del Estudio.
- Estudios Medioambientales de Base (Environmental Baseline Study), para conocer el estado original del área de potencial afección, donde se describan y evalúen las condiciones de partida.
- Predicción de impactos.
- Examen de alternativas del proyecto que resulten ambientalmente más adecuadas.
- Propuestas de mitigación y monitorización.
- Presentación de hallazgos y propuestas para la declaración de impacto ambiental.
- Programa de vigilancia y seguimiento ambiental.

La determinación del alcance del Estudio de Impacto Ambiental ha sido definida como la determinación de todos los posibles impactos del proyecto y de todas las alternativas que pudieran presentarse, los cuales son clave y de suficiente entidad que deben ser objeto de una evaluación posterior. Si no lleva a cabo la definición adecuada del alcance de un EIA se corre el

riesgo de llevar a cabo un trabajo innecesario, o que se pasan por alto consecuencias importantes [28].

Una vez establecidos los procedimientos disponibles se pueden establecer de modo general los pasos a seguir para la Evaluación de Impacto Ambiental según describe Tukker (2000) [30]. El primer paso en el plan de evaluación consiste en la selección de los baremos y criterios que se utilizarán para analizar los efectos de las actividades humanas. En términos generales, la cadena causal entre la intervención ambiental y efecto final se usa como base para llevar a cabo la evaluación del impacto.

De esto se deduce qué opciones en los siguientes aspectos determinan qué elementos se incluyen en el marco de evaluación de impacto ambiental:

- ¿Qué áreas de protección se consideran relevantes?
- ¿Qué categorías de impactos finales se consideran relevantes para cada área a proteger?
- ¿Se trata de modelizar la relación completa entre la perturbación medioambiental y el proceso generador o se trata de evaluar un punto intermedio del proceso?
- ¿Qué criterios se desean utilizar para juzgar la magnitud del efecto en el determinado punto del proceso?

Las preguntas anteriores ofrecen un marco bastante general para las evaluaciones ambientales. Las respuestas a estas preguntas determinan qué indicadores o baremos se utilizan en la evaluación de impacto: se pueden formular tanto el nivel de concreción como los marcos cuantitativos de evaluación a emplear, como elementos que son ampliamente utilizados en las ciencias ambientales.

Además de la elección de los baremos que reflejan los tipos de efectos ambientales que se desean incluir en la evaluación, una segunda fase importante que debe hacerse se refiere al conjunto de actividades de la sociedad para la que se desea analizar los impactos ambientales. En otras palabras, determinar los límites del sistema a evaluar. Existen varios enfoques posibles a esta opción. En primer lugar, uno puede concentrarse en un sistema regional delimitado: una sola planta, o un conjunto de actividades industriales en una región determinada. Alternativamente, se podría optar por lo que se ha denominado una perspectiva funcional. Es decir, determinar el impacto que genera un mismo elemento que forma parte de varios sistemas productivos.

Una vez que se han determinado los impactos en los sistemas a estudiar, la comparación de las alternativas se presupone sencilla. Se debe hacer un inventario de los impactos relativos a cada una de las alternativas estudiadas y se aplicarán los baremos que se estén utilizando. Si es necesario, se realizará un análisis de sensibilidad, y, a continuación, probablemente después de una etapa de ponderación, se deberá derivar una preferencia por una de las alternativas consideradas.

Figura 3: Procedimientos en la evaluación de componentes ambientales Traducido de [17]

3.2. Análisis de Riesgos Ambientales aplicado a las actividades mineras

Las actividades mineras son especialmente sensibles al desarrollo de los análisis de riesgos ambientales que se producen porque la actividad propiamente dicha se basa en la modificación permanente del medio en el que se desarrolla. Esto es debido a que su objetivo, expuesto de una manera muy básica, es la extracción de ingentes volúmenes de roca de la corteza terrestre y su procesamiento para el aprovechamiento de elementos contenidos, depositando grandes cantidades de residuos no aprovechables. Además, la duración del desarrollo de los proyectos mineros es del orden de decenas de años. En este escenario, la minería moderna, y de una manera cada vez más globalizada, considera como pilar fundamental la conservación del medio ambiente para poder mantener la licencia social para operar y de tal manera que se pueda hacer perdurar el desarrollo de la actividad minera en el tiempo.

Si bien se ha considerado durante muchos años que los recursos naturales eran inagotables, y la conservación del medio ambiente era una actividad secundaria, actualmente la explotación

de dichos recursos solo es compatible con la conservación del medio que los rodea, asumiendo de primera mano las bases del desarrollo sostenible.

Conceptos clave tales como “minería verde”, “minas ecológicas”, la “economía de reciclaje”, “ecología industrial”, la caracterización del emplazamiento para la recuperación de la ubicación y el entorno afectado de las minas abandonadas y la evaluación del ciclo de vida, han sido propuestas defendidas desde hace tiempo por los ecologistas, conservacionistas, economistas y académicos que trabajan en el campo de la ingeniería minera.

En términos conceptuales, la solución de los problemas ambientales generados por una actividad minera puede abordarse desde dos enfoques diferenciados: Uno de ellos es la adopción de medidas para disminuir el impacto de la minería sobre el medio ambiente durante la extracción. La otra es la toma de medidas para restaurar y restablecer el medio natural en la zona afectada por la actividad minera posteriormente al cierre y finalización de la actividad, tal y como se ilustra en la Figura 4 [31].

Figura 4: Implicaciones ambientales de la Minería [31]

Como se ha señalado anteriormente, en la fase previa al comienzo de la construcción de una mina, es necesaria la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental.

La Evaluación del Impacto Ambiental requiere la evaluación del potencial daño en el medio ambiente del proyecto minero en cuestión. El propósito de esta evaluación es determinar los cambios en el medio ambiente y los daños a la salud que puede provocar. Si se identifican riesgos inaceptables, se deberían hacer los cambios necesarios en el proyecto para evitar esta

situación. Por ejemplo, cambiando la ubicación de las escombreras, se pueden modificar las potenciales en áreas pobladas cercanas [27].

La actividad minera afecta significativamente al sistema ambiental local de varias maneras, incluyendo entre los impactos la subsidencia de los terrenos, la reducción del nivel freático de los acuíferos de la zona, las emisiones de gases, el cambio del uso del suelo y los daños a las estructuras, entre otros. El tipo de impacto específico sobre el medio ambiente y su grado de afección dependen en gran medida del tipo de ecosistema original [32].

Durante la etapa de diseño y planificación de la mina, el proceso de evaluación de riesgos proporciona una oportunidad única para abordar las preocupaciones de la comunidad donde se va a desarrollar el proyecto, incorporarlas y establecer buenas relaciones de trabajo con ella. Este aspecto se debe entender como una opción de aclarar posibles situaciones de bloqueo durante el proceso de autorización del proceso [27].

Incluso los mejores proyectos no siempre consiguen las mejores condiciones para su arranque y situaciones imprevistas pueden provocar afecciones puntuales en el medio ambiente. En estos casos, la evaluación de riesgos ayuda a escoger el mejor modo de gestionar estos eventos.

Cuando los recursos explotables se vayan agotando se requiere que para entonces esté planificado el cierre y abandono del emplazamiento. En este punto del proyecto, el análisis de riesgos puede revelarse como una herramienta fundamental para tener identificadas aquellas zonas generadoras de impactos y así poder priorizar su restauración [27].

3.3. El Análisis del Ciclo de Vida como herramienta de análisis.

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental y los posibles impactos asociados con los productos y servicios, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en este sentido es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

El ACV es una técnica analítica que tiene en cuenta los impactos ambientales globales de un producto, proceso o actividad humana, desde la adquisición de las materias primas, la producción y el uso, hasta la gestión de los residuos [30, 33, 34]. El ACV es el proceso que tiene en cuenta en la toma de decisiones todos los recursos consumidos así como las acciones generadas en el medio ambiente y sobre la salud que se producen y están asociadas a la fabricación de cierto producto o servicio. En este proceso se consideran desde la extracción de materias primas, la producción, el uso del producto, la reutilización del mismo, el transporte, reciclaje hasta el vertido final [35]. Esto implica que cualquier persona involucrada en cualquier fase del proceso productivo, puede influir en el resultado del ACV y tendrá una cierta

responsabilidad, es decir, un cierto papel que jugar en los impactos económicos, medioambientales y sociales del proceso.

Figura 5: Marco de trabajo del Análisis de Ciclo de Vida [35, 36]

Tal y como describe la Norma UNE-EN ISO 14040 [33, 36] el ACV puede ayudar a:

- La identificación de oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de productos en las distintas etapas de su ciclo de vida,
- La aportación de información a quienes toman decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (por ejemplo, para la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades, el diseño y rediseño de productos o procesos),
- La selección de los indicadores de desempeño ambiental pertinentes , incluyendo técnicas de medición, y
- El marketing (por ejemplo, implementando un esquema de etiquetado ambiental, elaborando una reivindicación ambiental, o de una declaración ambiental de producto).

En este marco, el ACV también es de aplicación a la industria de las materias primas minerales y existen múltiples estudios que avalan su utilización [35, 37-40], si bien la aplicación a las actividades mineras es limitada [38]. Esto puede ser debido a la falta de pensamiento en el ciclo de vida de la industria y, sin embargo, la minería es la actividad primaria generadora de las materias primas imprescindibles para poder iniciar el proceso productivo. Esta posición en la cadena de suministro hace que la perspectiva de los efectos e implicaciones de la actividad minera sobre un cierto producto terminado sea limitada.

El problema que presenta esta técnica es la falta de información y de datos disponibles para llevar a cabo el Análisis del Ciclo de Vida para un mineral específico. Esto es debido a la complejidad de la cadena de valor asociada a las sustancias minerales. De este modo, el Análisis de Ciclo de Vida sirve únicamente para entender los potenciales impactos ambientales. Por este motivo, para la toma de decisiones, tanto dentro como fuera de la industria minera, el

ACV debe considerarse únicamente como una herramienta más para ayudar a tomar decisiones en la línea de los objetivos del desarrollo sostenible [41].

Todavía hay reservas acerca del papel del ACV [34] y su introducción en el desarrollo de políticas empresariales, debido a que hay una absoluta falta de metodologías consistentes y falta de datos que permitan su adecuada aplicación. Asimismo es complicado definir indicadores para el desarrollo sostenible (y consecuentemente es complicado definir lo que se entiende por “producto sostenible”) y hay dificultades para integrar indicadores económicos y sociales con los medioambientales [41].

La diferencia entre el ACV y el Estudio de Impacto Ambiental (desarrollado en el Apartado 0) puede decirse que es que el ACV es una herramienta que ayuda al proceso de toma de decisiones mientras que el EIA es una herramienta de toma de decisiones en sí misma. Por otra parte, a diferencia del EIA, el ACV no está recogido en la legislación aplicable. Sin embargo, varios grupos de expertos científicos y los organismos internacionales de normalización como la ISO, han participado activamente en los esfuerzos que han llevado al establecimiento de un marco de aplicación bastante general [30].

A pesar del extenso consumo de productos mineros en todos los procesos industriales, no hay ninguna aplicación generalizada de ACV en la evaluación de los sistemas y técnicas de extracción. El número limitado de estudios de aplicación del ACV minería, y los factores de emisión resultantes, cuestiona la exactitud de otros datos de ACV y los factores de emisión. Además, no proporciona ninguna oportunidad para la evaluación de la ingeniería que se aplica en aquellos métodos mineros que utiliza una metodología ACV. A medida que más empresas mineras desarrollen programas de desarrollo sostenible, la visión proporcionada por el ACV será de mayor valor para la mejora de la gestión de los procesos mineros [38].

La falta de conciencia sobre las posibilidades y oportunidades del ACV, los desafíos de la definición de las unidades funcionales y de la definición del alcance del sistemas productivos, la definición de las categorías de impacto apropiadas, y cuestiones relacionadas con la incertidumbre y el análisis de sensibilidad se presentan como posibles causas de la falta de una amplia aceptación de esta técnica por parte de la industria [38].

3.4. Marco legislativo

La regulación de las actividades extractivas en España se viene haciendo desde hace más de cuarenta años, incluyendo la protección del espacio ocupado por las actividades mineras. En este contexto, la protección del medio ambiente viene documentándose desde hace siglos, habiendo ya referencias a afecciones ambientales en el siglo XIII, aunque la preocupación por la protección medioambiental se puede decir que se impulsa en los años 50 [42]. La filosofía y

los principios de evaluación del impacto ambiental se remontan a un enfoque racionalista de la toma de decisiones que surgió en la década de los 60 [43].

En España, en 1973 se promulgó la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas, que tiene por objeto establecer el régimen jurídico de la investigación y aprovechamiento de los yacimientos minerales y demás recursos geológicos, cualesquiera que fueren su origen y estado físico. El concepto de aprovechamiento engloba el conjunto de actividades destinadas a la explotación, preparación, concentración o beneficio de un recurso mineral, incluyendo las labores de rehabilitación del espacio natural afectado por las actividades mineras, de acuerdo con los principios de desarrollo sostenible y de la minimización de las afectaciones causadas por el laboreo de las minas. De hecho, la Ley de Minas, de forma precursora, se halla imbuida de una filosofía protectora del medio ambiente, cuyo esencia es que la obtención y el beneficio de un recurso natural, como son los recursos mineros, sólo debe comprometer en la menor cuantía posible la afectación al medio ambiente [44].

A mediados de la década de los 80, los Estados Miembros de la Comunidad Europea acordaron procedimientos obligatorios de la Evaluación de Impacto Ambiental.

En 2009 se desarrolló la normativa reguladora sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.

A continuación se hace una revisión de la normativa aplicable al contexto en el que se engloba la presente Tesis Doctoral. El objetivo es establecer una bases regulatorias sobre las que se van a basar el gran medida los exposiciones metodológicas que se desarrollan a lo largo de la misma. Se mostrarán el campo de aplicación, objetivos y, en ciertos casos, las debilidades de la normativa regulatoria, destacando aquellos aspectos a los que se pretende dar respuesta con este trabajo de investigación.

3.4.1. Directiva 2004/35/CE

En el año 2004, se publicó en el Diario Oficial de la Unión Europea de fecha 30 de abril de 2004, la **Directiva 2004/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea de 21 de abril de 2004 sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales** [45], diseñando el marco necesario para el establecimiento de las bases para la legislación de las medidas necesarias para la adopción de medidas preventivas antes de que ocurra el daño, adopción de acciones reparadoras una vez producido el daño, establecer el organismo responsable de la asunción de los costes de prevención y reparación así como el establecimiento de garantías para llevarlos a cabo.

En esta Directiva se establece que la prevención y reparación de los daños medioambientales debe llevarse a cabo mediante el fomento del principio con arreglo al cual **“quien contamina paga”** coherentemente con el principio de desarrollo sostenible. El principio fundamental de la

presente Directiva debe, por tanto, consistir en que un operador cuya actividad haya causado daños al medio ambiente o haya supuesto una amenaza inminente de tales daños sea declarado responsable desde el punto de vista financiero a fin de inducir a los operadores a adoptar medidas y desarrollar prácticas dirigidas a minimizar los riesgos de que se produzcan daños medioambientales, de forma que se reduzca su exposición a responsabilidades financieras.

La Directiva debe aplicarse, en cuanto a los daños medioambientales se refiere, a las actividades profesionales que presenten un riesgo para la salud humana o el medio ambiente. Estas actividades deben identificarse, en principio, por referencia a la legislación comunitaria pertinente que establece requisitos normativos respecto de determinadas actividades o prácticas que entrañan un riesgo potencial o real para la salud humana o para el medio ambiente.

Los Estados miembros deben tomar medidas para animar a los operadores a utilizar seguros apropiados u otras formas de garantía financiera y para fomentar el desarrollo de instrumentos y mercados de garantía financiera, a fin de proteger de forma eficaz las obligaciones financieras que establece la presente Directiva.

Cuando aún no se hayan producido los daños medioambientales pero exista una amenaza inminente de que se produzcan, el operador adoptará, sin demora, las medidas preventivas necesarias.

Cuando se hayan producido daños medioambientales, el operador informará sin demora a la autoridad competente de todos los aspectos pertinentes de la situación y adoptará todas las medidas posibles para, de forma inmediata, controlar, contener, eliminar o hacer frente de otra manera a los contaminantes de que se trate y a cualesquiera otros factores perjudiciales, con objeto de limitar o impedir mayores daños medioambientales y efectos adversos para la salud humana o mayores daños en los servicios y las medidas reparadoras necesarias.

El operador sufragará los costes ocasionados por las acciones preventivas y reparadoras adoptadas en virtud de la presente Directiva.

La autoridad competente recuperará del operador que haya causado los daños o la amenaza inminente de esos daños, los costes que le haya supuesto la adopción de acciones preventivas o reparadoras en virtud de la presente Directiva. Sin embargo, la autoridad competente podrá decidir no recuperar los costes íntegros cuando los gastos necesarios para hacerlo sean superiores al importe recuperable, o cuando no pueda identificarse al operador.

3.4.2. Ley 26/2007. Ley de Responsabilidad Medioambiental

Con fecha 24 octubre 2007, se publicó en el Boletín Oficial del Estado la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental por medio de la cual se incorpora al ordenamiento jurídico interno la Directiva comunitaria 2004/35/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de abril de 2004, sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales [46].

No todos los recursos naturales están protegidos por esta ley. Tan solo lo están aquellos que tienen cabida en el concepto de daño medioambiental, a saber: los daños a las aguas; los daños al suelo; los daños a la ribera del mar y de las rías; y los daños a las especies de la flora y de la fauna silvestres presentes permanente o temporalmente en España, así como a los hábitat de todas las especies silvestres autóctonas. Quedan excluidos los daños al aire y los denominados daños tradicionales, es decir los daños a las personas y a sus bienes (salvo que estos últimos constituyan un recurso natural). Igualmente, no todos los daños que sufran estos recursos naturales generarán responsabilidad medioambiental. Para que la ley pueda ser aplicada, se deberá estar en presencia de amenazas de daños o de daños propiamente dichos que produzcan efectos adversos significativos sobre el propio recurso natural. En el caso de los suelos el concepto de daño incluye, además, los riesgos significativos de que se produzcan efectos adversos sobre la salud humana.

La delimitación del ámbito de aplicación de esta ley se completa combinando tres elementos como son: el tipo de actividad económica o profesional de que se trate; la clase de medida que deba adoptar el operador y la naturaleza de la responsabilidad en la que éste pueda haber incurrido.

El carácter objetivo del régimen de responsabilidad medioambiental se refuerza con una presunción por virtud de la cual se considera que las actividades económicas o profesionales, en las cuales esta ley es aplicable, que han causado el daño o la amenaza de que el daño se produzca cuando atendiendo a su naturaleza intrínseca o a la forma en la que han sido desarrolladas sean apropiadas para causarlo.

Esta ley se aplicará a los daños medioambientales y a las amenazas inminentes de que tales daños ocurran, cuando hayan sido causados por las actividades económicas o profesionales enumeradas en la misma, aunque no exista dolo, culpa o negligencia. Esta ley presume, salvo prueba en contrario, que una actividad económica o profesional de las enumeradas en la misma ha causado el daño o la amenaza inminente de que dicho daño se produzca cuando, atendiendo a su naturaleza intrínseca o a la forma en que se ha desarrollado, sea apropiada para causarlo.

Esta ley también se aplicará a los daños medioambientales y a las amenazas inminentes de que tales daños ocurran, cuando hayan sido causados por las actividades económicas o

profesionales distintas de las enumeradas en la ley, en los siguientes términos: Cuando medie dolo, culpa o negligencia, serán exigibles las medidas de prevención, de evitación y de reparación; cuando no medie dolo, culpa o negligencia, serán exigibles las medidas de prevención y de evitación.

Esta Ley sólo se aplicará a los daños medioambientales, o a la amenaza inminente de tales daños, causados por una contaminación de carácter difuso, cuando sea posible establecer un vínculo causal entre los daños y las actividades de operadores concretos.

Esta ley no se aplicará a los daños medioambientales ni a las amenazas inminentes de que tales daños se produzcan cuando hayan sido ocasionados por: un acto derivado de un conflicto armado, de hostilidades, de guerra civil o de una insurrección; un fenómeno natural de carácter excepcional, inevitable e irresistible; las actividades cuyo principal propósito sea servir a la defensa nacional o a la seguridad internacional, y las actividades cuyo único propósito sea la protección contra los desastres naturales.

Al respecto del ámbito de aplicación, las actividades profesionales donde es de potencial aplicación a las industrias de explotación de recursos minerales son las siguientes:

- Todos los vertidos en aguas interiores superficiales sujetas a autorización previa de conformidad con el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico y la legislación autonómica aplicable.
- Todos los vertidos en las aguas subterráneas sujetas a autorización previa de conformidad con el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y la legislación autonómica aplicable.
- Todos los vertidos en aguas interiores y mar territorial sujetos a autorización previa de conformidad con lo dispuesto en la ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas y en la legislación autonómica aplicable.
- El vertido o la inyección de contaminantes en aguas superficiales o subterráneas sujetas a permiso, autorización o registro de conformidad con el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- La captación y el represamiento de aguas sujetos a autorización previa de conformidad con el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.
- La gestión de los residuos de las industrias extractivas, según lo dispuesto en la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE.

Además también están incluidos en la ley las actividades sujetas a la Ley de Prevención y Control Integrados de la Contaminación; las actividades de gestión de residuos; la fabricación, utilización, almacenamiento, transformación, embotellado, liberación en el medio de

sustancias peligrosas, fitosanitarias, biocidas y microorganismos; el transporte de mercancías peligrosas o contaminantes, además de organismos modificados genéticamente, incluidos los transportes transfronterizos y la explotación de instalaciones que están sujetas a autorización de conformidad relativa a la lucha contra la contaminación atmosférica.

Por tanto, las actividades mineras están sujetas al ámbito de aplicación de esta Ley.

La ley desarrolla las obligaciones de los operadores en materia de prevención, de evitación y de reparación, así como las obligaciones que corresponden a las administraciones públicas y las potestades que les reconoce la ley para llevar a cabo su cumplimiento.

Por otro lado, se establecen las garantías financieras cuya constitución es requisito imprescindible para el ejercicio de las actividades profesionales relacionadas, con el fin de asegurar que el operador dispondrá de recursos económicos suficientes para hacer frente a los costes derivados de la adopción de las medidas de prevención, de evitación y de reparación de los daños medioambientales.

3.4.3. Ley 11/2014, por la que se modifica la ley 26/2007, de Responsabilidad Medioambiental.

Recientemente se ha terminado el procedimiento de modificación de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de responsabilidad medioambiental, publicando la Ley 11/2014, por la que se modifica dicha Ley [47].

El objeto principal de la modificación está en dar mayor importancia a los aspectos relativos a la prevención del daño medioambiental, y desarrollar de una manera más simplificada en procedimiento de establecer las garantías financieras obligatorias.

Además, se van a introducir cambios para adaptar las disposiciones relativas al Fondo de Compensación de daños ambientales modificaciones en el capítulo sobre infracciones y sanciones y el articulado relativo a los procedimientos de exigencia de responsabilidad medioambiental.

3.4.4. R. D. 2090/2008. Desarrollo de la Ley de Responsabilidad Medioambiental.

En el Boletín Oficial del Estado de 23 de diciembre de 2008 se publicó el Real Decreto 2090/2008, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.

El Real Decreto dispone un marco metodológico para determinar el daño medioambiental que se ha producido y, en función de su alcance, establecer las medidas de reparación necesarias en cada caso.

La determinación del daño medioambiental, que se regula en este Real Decreto, comprende la realización de una serie de operaciones encaminadas, en primer lugar, a identificar el agente causante del daño y los recursos naturales y servicios afectados; en segundo lugar, a cuantificar el daño en función de su extensión, intensidad y escala temporal y, finalmente, a evaluar su significatividad. El reglamento incluye en su anexo I una descripción pormenorizada de algunos aspectos técnicos asociados a este proceso de determinación. Por otro lado, dado que la determinación de la significatividad del daño es una operación crucial, puesto que sobre ella descansa la aplicabilidad del sistema de responsabilidad medioambiental, se ha procurado recurrir a criterios que garanticen la objetividad en esa labor de apreciación. Por ello, cuando ha sido posible, se ha optado por referir dicha significatividad a los estándares ya previstos en otras normas para cada recurso natural, dado que reflejan lo que debe entenderse por un estado razonable de conservación de cada uno de ellos, y por ende, permiten calificar la alteración adversa de ese estado como un daño significativo que debe repararse.

Además de los criterios de significatividad del daño que toman como referencia el recurso natural afectado, también se han incluido criterios basados en el tipo de agente que lo genera, especialmente para aprovechar la creciente información y experiencia que existe en el campo de los agentes químicos. Asimismo, se incluye un criterio subsidiario para determinar la significatividad de los daños a las aguas y a los suelos ya contaminados en aquellos casos en que no fuera posible determinarlo conforme a las reglas anteriores. Este criterio, que se basa en el servicio de acogida o de hábitat que prestan el suelo y las aguas, presume que los daños a los citados recursos naturales tendrán carácter significativo cuando lo sean los daños a las especies silvestres que los habitan.

En este Real Decreto se regulan las medidas de reparación primaria, complementaria y compensatoria. Los preceptos sobre reparación primaria no entrañan mayor dificultad pues son reflejo de la reparación que tradicional y principalmente se ha venido realizando de los daños al medioambiente. Así, el reglamento expone las distintas medidas que deben conducir a la restitución del estado básico, tales como la eliminación, retirada o neutralización del agente causante del daño, la reposición del recurso afectado o la recuperación natural y señala la necesidad de estudiar distintas alternativas de reparación primaria para seleccionar la más adecuada en cada caso.

Mayor novedad presentan las pautas que se prevén para la determinación de las medidas de reparación complementaria y compensatoria y en cuya elaboración se han tomado como referencia los trabajos y estudios elaborados por la Comisión Europea sobre la metodología necesaria para aplicar la Directiva 2004/35/CE.

En este Real Decreto se ha tratado de reflejar los supuestos en que debe acometerse una reparación complementaria, incidiendo en el supuesto de que la reparación primaria no se considere razonable, bien porque el plazo necesario para su efectividad, bien porque su coste, resulten desproporcionados en relación con el beneficio ambiental que se vaya a obtener. Además, con la finalidad de reducir el grado de indeterminación que pueda suponer la

apreciación de dicho beneficio ambiental, se prevé que se tenga en cuenta el valor social de los recursos y servicios naturales perdidos, entendido éste como expresión monetaria del bienestar o utilidad que aquellos generan.

Por otro lado, la tipología de medidas de reparación se cierra con las medidas compensatorias que se aplicarán para “compensar” las pérdidas provisionales de recursos naturales y servicios desde que se produce el daño hasta que produce efecto la reparación primaria, o en su caso, complementaria.

Puesto que, tanto la reparación complementaria como la compensatoria suponen la creación adicional de recursos naturales y de servicios, es necesaria la aplicación de criterios de equivalencia que permitan calcular esos nuevos recursos que se van a generar con la reparación para que sean del mismo tipo, calidad y cantidad que los dañados.

En el ámbito de la reparación complementaria y compensatoria requiere una mención especial el lugar en el que debe acometerse dicha reparación. Así, se opta por acudir preferentemente al lugar donde se ha producido el daño –o en el lugar más cercano a la ubicación de los recursos naturales y servicios dañados–, aunque si esto no resulta posible o adecuado, la autoridad competente podrá acordar que la reparación se realice en un lugar alternativo vinculado geográficamente a los citados recursos naturales, entendiendo que existe dicha vinculación cuando pueda establecerse una conexión ecológica, territorial o paisajística. En los casos en que la reparación se efectúe en un lugar distinto al dañado, si bien se prevé que el operador deberá tener en cuenta los intereses de la población afectada, corresponde especialmente a la autoridad competente velar por la adecuada ponderación de dichos intereses en el momento de la aprobación del proyecto.

El Real Decreto aborda los aspectos relativos a la garantía financiera obligatoria y se divide en tres secciones. La sección 1ª está dedicada a la determinación de la citada garantía y el núcleo central de esta regulación es la descripción de los pasos necesarios para el cálculo de su cuantía. Como prevé el artículo 24.3 de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, dicho cálculo debe partir de una evaluación homogénea de los escenarios de riesgos y de los costes de reparación por lo que es necesario que este reglamento prevea el alcance y el contenido del correspondiente análisis de riesgos. Además, para proporcionar seguridad a la determinación final de la cuantía de la garantía se prevé que el análisis de riesgos deba ser verificado por un organismo acreditado.

Para la fijación de la cuantía de la garantía financiera se tomará como punto de partida el análisis de riesgos que deberá: Identificar los escenarios accidentales y su probabilidad de ocurrencia; establecer el valor monetario del daño asociado a cada escenario a partir de la cuantificación del daño y del coste de la reparación primaria; y determinar el riesgo asociado a estos escenarios, entendido éste como producto de la probabilidad de ocurrencia y el valor del daño de cada escenario; seleccionar los escenarios accidentales de menor coste asociado que agrupen el 95 por ciento del riesgo total y, en último lugar, establecer como propuesta de

cuantía de la garantía la del daño medioambiental más alto entre los escenarios seleccionados. Este criterio de selección de los escenarios de referencia pretende alcanzar un equilibrio entre los riesgos cubiertos y la cuantía de la garantía. Así se mantiene un elevado nivel de cobertura, al quedar incluidos los escenarios que agrupan el 95 por ciento del riesgo total, si bien se excluyen del cálculo los escenarios más improbables y de coste manifiestamente más alto, puesto que su inclusión sesgaría la cuantía de la garantía hacia un coste excesivo para el operador.

Finalmente, En el Real Decreto se establece que la autoridad competente determinará la cuantía de la garantía tras la comprobación del cumplimiento de los requisitos formales de la propuesta presentada por el operador en su análisis de riesgos.

En cuanto a la elaboración del análisis de riesgos, se seguirá la metodología prevista en el propio reglamento y en la norma UNE 150008 u otras equivalentes. Ahora bien, con el objetivo de facilitar la realización de dicho análisis, se flexibilizan las reglas aplicables a la determinación del daño, ya que podría resultar excesivo exigir el mismo grado de detalle para determinar un daño hipotético que un daño que ya se ha producido. En todo caso, se mantienen una serie de parámetros que deberán valorarse con el fin de asegurar una correspondencia entre la cobertura de la garantía y el estudio que se realizará para evaluar y reparar el daño. Asimismo, con la misma finalidad de flexibilización, se establecen dos reglas específicas para simplificar la cuantificación del daño. La primera regla permite la utilización de modelos de simulación del comportamiento del agente causante del daño; la segunda establece unos valores concretos para la intensidad del daño.

En relación con la continuidad de la garantía financiera se prevé que deba mantenerse en vigor durante todo el período de actividad, con independencia de que pueda renovarse alguno de sus elementos, tales como la modalidad de garantía por la que se opte o la entidad financiera o aseguradora con la que se suscriba.

3.4.5. Informes MIRAT

El Real Decreto 2090/2008 [48] establece que para facilitar la evaluación de los escenarios de riesgos así como para reducir el coste de su realización, prevé distintos instrumentos de carácter voluntario, tales como los análisis de riesgos medioambientales sectoriales y las tablas de baremos. Los análisis sectoriales, que deberán ser particularizados para cada caso concreto, pueden consistir bien en modelos de informe de riesgos ambientales tipo (los denominados MIRAT) bien en guías metodológicas cuando la heterogeneidad de las actividades que integren un mismo sector así lo requiera. En ambos casos se requerirá informe de la Comisión técnica de prevención y reparación de daños medioambientales y su difusión corresponderá al Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Ambos instrumentos, tal y como se deriva de la disposición final única del Reglamento, deberán estar elaborados antes de la

aprobación de las órdenes ministeriales previstas en la disposición final cuarta de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, para la exigibilidad de la garantía financiera obligatoria. Las tablas de baremos están previstas para los sectores o pequeñas y medianas empresas que, por su alto grado de homogeneidad, permitan la estandarización de sus riesgos ambientales. Dichas tablas podrán incluirse en las citadas órdenes ministeriales [48].

Estos modelos deberán someterse a aprobación por parte de la Comisión técnica de prevención y reparación de riesgos medioambientales. Los modelos permitirán facilitar, abaratar y homogenizar la realización del análisis de riesgos medioambientales y la cuantificación de la garantía financiera obligatoria en las empresas [48, 49].

Este modelo deberá ser coordinado por las asociaciones sectoriales y solo podrá haber uno por sector, permitiendo reducir significativamente los costes de ejecución de los análisis de riesgos individuales y las incertidumbres en los contenidos. Además, al haber sido informado positivamente por la Comisión Técnica, las aseguradoras tendrán una visión más clara de la metodología utilizada, con mayores garantías y certidumbre de los análisis de riesgos, que redundará así mismo en la reducción de la prima de las asociadas a un excesivo conservadurismo. Una vez que el MIRAT sea aprobado se convertirá en público [48, 49].

La aprobación de un MIRAT por parte de la Comisión Técnica de Prevención llevará implícito que el Modelo ha sido elaborado de acuerdo a los requisitos del Reglamento y que, por tanto, cumple con la Norma UNE 150.008 o similar, no siendo necesario su verificación por entidad verificadora. Las entidades verificadoras para dar cumplimiento al artículo 45 del Real Decreto, en los análisis de riesgos ambientales realizados en base a un MIRAT aprobado por la Comisión Técnica, únicamente tendrá que comprobar los datos de entrada y salida para corroborar su adecuación a los requisitos establecidos [48, 49].

3.4.6. R. D. 975/2009. Normativa sobre residuos de industrias extractivas

Con fecha 13 de junio de 2009, se publicó en el Boletín Oficial del Estado el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras [44], que se describe a continuación.

El presente real decreto tiene por objeto el establecimiento de medidas, procedimientos y orientaciones para prevenir o reducir en la medida de lo posible los efectos adversos que sobre el medio ambiente, en particular sobre las aguas, el aire, el suelo, la fauna, la flora y el paisaje, y los riesgos para la salud humana puedan producir la investigación y aprovechamiento de los yacimientos minerales y demás recursos geológicos, y, fundamentalmente, la gestión de los residuos mineros.

El real decreto será de aplicación a todas las actividades de investigación y aprovechamiento de los yacimientos minerales y demás recursos geológicos. Se entenderá por investigación al conjunto de trabajos realizados dentro de un perímetro demarcado y durante un plazo determinado, encaminados a poner de manifiesto uno o varios recursos geológicos regulados en la Ley de Minas. Se entenderá por aprovechamiento al conjunto de actividades destinadas a la explotación, almacenamiento, preparación, concentración o beneficio de los yacimientos minerales y demás recursos geológicos regulados en la Ley de Minas, incluyendo las labores de rehabilitación de los espacios afectados por la actividad minera.

También será de aplicación a las actividades de investigación y explotación de hidrocarburos únicamente en lo referente a las disposiciones relativas a la gestión de los residuos que se deriven de ellas y adaptadas a sus condiciones particulares.

Es interesante destacar que quedan excluidos del ámbito de aplicación del presente real decreto:

- Las actividades de investigación y aprovechamiento submarino de recursos minerales.
- La inyección de aguas que contengan sustancias resultantes de la investigación y aprovechamiento de recursos minerales, así como la inyección de aguas por razones técnicas en formaciones geológicas de las que se haya extraído alguna sustancia incluida en el ámbito de aplicación de la Ley de Minas, o en formaciones geológicas que por razones naturales no sean apropiadas, de manera permanente, para otros fines. Tales reinyecciones no contendrán sustancias distintas de las resultantes de las operaciones antedichas.
- La reinyección de aguas subterráneas bombeadas procedentes de minas y canteras.

Además, El Real Decreto define requisitos generales y contenidos que deberá cumplir el preceptivo Plan de Restauración.

Se establece que la entidad explotadora está obligada a tomar todas las medidas necesarias para prevenir o reducir en lo posible cualquier efecto negativo sobre el medio ambiente y sobre la salud de las personas derivado de la investigación y aprovechamiento de recursos minerales. Dichas medidas estarán basadas en las mejores técnicas disponibles e incluirán la gestión de los residuos mineros y de todas las instalaciones de residuos también con posterioridad a su cierre, cuando proceda, así como la prevención de accidentes graves que puedan ocurrir en las instalaciones, y la limitación de sus consecuencias para el medio ambiente y la salud humana.

Se establece que el plan de restauración estará estructurado tal y como se describe a continuación, y contendrá, como mínimo:

- Descripción detallada del entorno previsto para desarrollar las labores mineras.

- Medidas previstas para la rehabilitación del espacio natural afectado por la investigación y explotación de recursos minerales.
- Medidas previstas para la rehabilitación de los servicios e instalaciones anejos a la investigación y explotación de recursos minerales.
- Plan de Gestión de Residuos.
- Calendario de ejecución y coste estimado de los trabajos de rehabilitación.

Con carácter previo al otorgamiento de una autorización, permiso o concesión regulada por la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas, el solicitante deberá presentar ante la autoridad competente en minería un plan de restauración del espacio natural afectado por las labores mineras cuyo contenido se ajustará a lo establecido en el presente real decreto, teniendo en cuenta los aspectos propios de su actividad que puedan tener efectos negativos sobre el medio ambiente o la salud de las personas. Dicho plan deberá acompañar a la documentación correspondiente a la solicitud de autorización, permiso o concesión.

El solicitante deberá acreditar a la autoridad competente que, de acuerdo con la legislación de contratos del sector público, dispone de capacidad y de solvencia económica y financiera y técnica o profesional suficiente para asegurar el cumplimiento del plan de restauración.

Es destacable el concepto de que no podrán otorgarse autorizaciones, permisos o concesiones reguladas por la Ley de Minas sin tener autorizado un plan de restauración y, una vez otorgados, no podrán iniciarse los trabajos hasta tener constituidas las correspondientes garantías financieras o equivalentes que aseguren su cumplimiento.

3.4.7. Ley 22/2011. Ley de residuos y suelos contaminados.

Con fecha 29 de julio de 2011 se publicó en el Boletín Oficial del Estado la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados [50]. Esta Ley tiene por objeto regular la gestión de los residuos impulsando medidas que prevengan su generación y mitiguen los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente asociados a su generación y gestión, mejorando la eficiencia en el uso de los recursos. Tiene asimismo como objeto regular el régimen jurídico de los suelos contaminados.

Esta Ley es de aplicación a todo tipo de residuos, con las siguientes exclusiones:

- Las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera, así como el dióxido de carbono capturado y transportado con fines de almacenamiento geológico y efectivamente almacenado en formaciones geológicas de conformidad con la Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono. Tampoco se aplicará al almacenamiento geológico de dióxido de carbono realizado con fines de investigación, desarrollo o experimentación de nuevos productos y procesos

siempre que la capacidad prevista de almacenamiento sea inferior a 100 kilotoneladas.

- Los suelos no contaminados excavados y otros materiales naturales excavados durante las actividades de construcción, cuando se tenga la certeza de que estos materiales se utilizarán con fines de construcción en su estado natural en el lugar u obra donde fueron extraídos.
- Los residuos radiactivos.
- Los explosivos desclasificados.
- Ciertas materias fecales, paja y otro material natural, agrícola o silvícola, no peligroso, utilizado en explotaciones agrícolas y ganaderas, en la silvicultura o en la producción de energía a base de esta biomasa, mediante procedimientos o métodos que no pongan en peligro la salud humana o dañen el medio ambiente.

La Ley contiene las disposiciones y los principios generales, incluyendo el objeto, las definiciones, así como la referencia a la clasificación y la lista europea de residuos. Esta Ley tiene también por objeto regular el régimen jurídico de los suelos contaminados. Además, en esta Ley están también recogidos los principios de la política de residuos y a las competencias administrativas.

Debido a que son varias las administraciones públicas que intervienen en la gestión de los residuos, se hace necesario un artículo que defina las competencias administrativas de cada una de ellas. Se clarifica la distribución competencial existente en la anterior Ley, especialmente en lo relativo a las Entidades Locales, que podrán establecer a través de sus ordenanzas las condiciones para la entrega de los residuos cuya gestión hayan asumido.

Con el objetivo de configurar un foro de autoridades administrativas competentes en esta materia la Ley incluye la creación de una Comisión de coordinación en materia de residuos como órgano de cooperación técnica y colaboración entre las distintas administraciones, integrada por representantes de la Administración General del Estado (de los departamentos ministeriales con competencias en esta materia), de las Comunidades y Ciudades Autónomas, y de las Entidades Locales. Esta Comisión podrá crear grupos de trabajo especializados en los que participarán expertos en la materia de que se trate, del sector público o privado.

La Ley también recoge los conceptos de “Producción, posesión y gestión de los residuos» y desarrolla las obligaciones de los productores y gestores de residuos. El objetivo ha sido lograr una mayor claridad y sistematización de las obligaciones de los sujetos intervinientes en la cadena de producción y gestión de residuos, así como una simplificación de las cargas administrativas sobre los operadores, sustituyendo parte de las autorizaciones existentes en la anterior Ley por comunicaciones. Esta evolución de la sustitución de autorizaciones por comunicaciones se enmarca en el proceso general de sustitución del control a priori de la administración por un control a posteriori, que no ralentice el inicio de las actividades económicas, pero que en todo caso no supone una pérdida de control por parte de la administración sino un cambio en el momento en el que éste se lleva a cabo.

La Ley también define la “Responsabilidad ampliada del productor del producto”. Si bien no puede afirmarse que esta regulación se introduzca ex novo, sí cabe destacar que se establece por primera vez un marco legal sistematizado y coherente, en virtud del cual los productores de productos que con su uso se convierten en residuos quedan involucrados en la prevención y en la organización de la gestión de los mismos, promoviéndose la reutilización, el reciclado y la valorización de residuos, de acuerdo con los principios inspiradores de esta nueva legislación.

La Ley delimita el ámbito de esta responsabilidad, estableciendo las obligaciones a las que, mediante el correspondiente desarrollo reglamentario, pueden quedar sometidos los productores, tanto en la fase de diseño y producción de sus productos como durante la gestión de los residuos que deriven de su uso.

Esta Ley también contiene la regulación de los suelos contaminados, concepto utilizado por primera vez en nuestro ordenamiento jurídico en la Ley 10/1998, de 21 de abril, que esta Ley deroga. Por este motivo se ha considerado fundamental mantener el régimen jurídico que ya está en vigor, si bien a la luz de la experiencia adquirida se matizan algunas cuestiones como la determinación de los sujetos responsables de la contaminación de los suelos. Asimismo, y con la finalidad de adquirir un mejor conocimiento de la situación de los suelos contaminados se regulan las obligaciones de información a las que quedan sujetos tanto los titulares de las actividades potencialmente contaminantes del suelo como los titulares de los suelos contaminados y se crea el inventario estatal de suelos contaminados.

La Ley regula el Registro de producción y gestión de residuos que incorpora la información procedente de los registros de las Comunidades Autónomas y dicha información podrá ser utilizada por otra administración pública con el fin de reducir las cargas administrativas.

Finalmente, esta Ley regula la responsabilidad, la vigilancia, inspección y control, y el régimen sancionador. En consonancia con la supresión de determinadas autorizaciones administrativas y su sustitución por una comunicación previa al inicio de las actividades, la Ley refuerza las potestades de las administraciones públicas para la inspección, la vigilancia y control de las actividades relacionadas con los residuos y los suelos contaminados.

El régimen sancionador supone una actualización del contenido en la Ley 10/1998, de 21 de abril. Con esta finalidad, y teniendo en cuenta la experiencia adquirida, se han tipificado con mayor precisión determinadas infracciones y sanciones, haciéndolas más acordes y eficaces respecto a las finalidades que se persiguen.

3.4.8. Ley 21/2013. Ley de Evaluación ambiental

Con fecha 11 de diciembre de 2013, se publicó en el Boletín Oficial del Estado la Ley 21/2013, de evaluación ambiental [23]. Esta ley establece las bases que deben regir la evaluación ambiental de los planes, programas y proyectos que puedan tener efectos significativos sobre

el medio ambiente, garantizando en todo el territorio del Estado un elevado nivel de protección ambiental, con el fin de promover un desarrollo sostenible, mediante:

- La integración de los aspectos medioambientales en la elaboración y en la adopción, aprobación o autorización de los planes, programas y proyectos;
- el análisis y la selección de las alternativas que resulten ambientalmente viables;
- el establecimiento de las medidas que permitan prevenir, corregir y, en su caso, compensar los efectos adversos sobre el medio ambiente;
- el establecimiento de las medidas de vigilancia, seguimiento y sanción necesarias para cumplir con las finalidades de esta ley.

Asimismo, esta ley establece los principios que informarán el procedimiento de evaluación ambiental de los planes, programas y proyectos que puedan tener efectos significativos sobre el medio ambiente, así como el régimen de cooperación entre la Administración General del Estado y las comunidades autónomas a través de la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente.

La ley contiene los principios y disposiciones generales, las disposiciones reguladoras de los procedimientos de evaluación ambiental y, por último, regula el seguimiento y el régimen sancionador.

El título I establece los principios y las disposiciones de carácter general, aplicables tanto a la evaluación ambiental estratégica como a la evaluación de impacto ambiental.

El título II está dedicado, en capítulos separados, a la evaluación ambiental estratégica y a la evaluación de impacto ambiental, estableciendo una regulación de carácter básico, aplicable, por tanto, a todo el territorio del Estado con las salvedades establecidas en la disposición final octava, que determina los artículos que no tienen carácter básico.

El título III regula, en tres capítulos separados, el seguimiento de los planes y programas y de las declaraciones de impacto ambiental, que se atribuyen al órgano sustantivo, el régimen sancionador y el procedimiento sancionador, incorporando mejoras técnicas para superar algunas deficiencias de la anterior ley.

3.4.9. Normas UNE

En el contexto legislativo descrito, se hace necesaria una metodología común que oriente a los distintos actores que intervienen en el estudio, análisis y evaluación del riesgo ambiental, de forma que facilite a todos los implicados en este proceso el intercambio de información ligada al riesgo ambiental de una determinada instalación o actividad [25].

En el ámbito normativo, se han desarrollado también diversas iniciativas nacionales que tratan el riesgo ambiental desde la perspectiva de su análisis, de su evaluación e incluso de su gestión.

En el contexto del desarrollo de esta Tesis, se hace una relación de Normas nacionales que sirven de apoyo y referencia dentro del objeto y alcance de la misma.

3.4.9.1. Norma UNE-EN 31010. Gestión del riesgo. Técnicas de apreciación del riesgo

La Norma UNE-EN 31010 [51] es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 31010:2010 que a su vez adopta la Norma Internacional ISO/IEC 31010:2009.

Esta norma internacional es una norma de apoyo de la Norma ISO 31000, y proporciona directrices para la selección y aplicación de técnicas sistemáticas para la apreciación del riesgo. La apreciación del riesgo realizada de acuerdo con esta norma contribuye a otras actividades de gestión del riesgo. Se presenta la aplicación de una serie de técnicas, con referencias específicas a otras normas internacionales, donde el concepto y la aplicación de técnicas se describen con mayor detalle. Esta norma no está prevista para fines de certificación, ni para usos reglamentarios o contractuales. Esta norma no proporciona criterios específicos para identificar la necesidad de aplicar el análisis del riesgo, ni especifica el método de análisis del riesgo que se requiere para una aplicación particular.

Esta norma no hace referencia a todas las técnicas, y la omisión de una técnica en esta norma no significa que dicha técnica no sea válida. El hecho de que un método sea aplicable a una circunstancia particular no significa que éste se debería aplicar necesariamente.

La gestión del riesgo incluye la aplicación de métodos lógicos y sistemáticos para:

- Comunicar y consultar a lo largo de este proceso;
- Establecer del contexto para la identificación, análisis, evaluación, tratamiento del riesgo asociado con cualquier actividad, proceso, función o producto;
- Realizar el seguimiento y revisar los riesgos;
- Informar y registrar los resultados de manera apropiada.

La apreciación del riesgo es la parte de la gestión del riesgo que proporciona un proceso estructurado que identifica la manera en que los objetivos pueden resultar afectados, y analiza el riesgo en términos de consecuencias y de sus probabilidades antes de decidir si se necesita un tratamiento adicional.

La apreciación del riesgo trata de dar respuesta a las siguientes cuestiones fundamentales:

- ¿Qué puede suceder y porque (para la identificación del riesgo)?
- ¿Cuáles son las consecuencias?
- ¿Cuál es la probabilidad de su ocurrencia futura?
- ¿Existen factores que mitiguen las consecuencias del riesgo o que reduzcan la probabilidad del riesgo?
- ¿Es el nivel de riesgo tolerable o aceptable y requiere tratamiento adicional?

Esta norma está prevista para reflejar las buenas prácticas actuales en la selección y utilización de las técnicas de apreciación del riesgo, y no se refiere a conceptos nuevos o desarrollados que no hayan alcanzado un nivel satisfactorio de consenso profesional.

Esta norma es de carácter general, por lo que puede proporcionar directrices a seguir por numerosas industrias y diferentes tipos de sistemas. En estas industrias pueden existir normas más específicas que establezcan metodologías y niveles de apreciación preferentes para aplicaciones particulares. Si tales normas están en armonía con esta norma, las normas específicas generalmente serán suficientes.

La apreciación del riesgo comprende los elementos centrales del proceso de gestión del riesgo y contiene los siguientes elementos:

- Comunicación y la consulta;
- Establecimiento del contexto;
- Apreciación del riesgo (que comprende la identificación del riesgo, el análisis del riesgo y la evaluación del riesgo);
- Tratamiento del riesgo;
- Seguimiento y revisión.

La apreciación del riesgo no es una actividad aislada, y debería estar totalmente integrada con los otros componentes del proceso de gestión del riesgo.

La apreciación del riesgo proporciona a las personas que toman decisiones y a las partes responsables una mejor comprensión de los riesgos que podrían afectar al logro de los objetivos y a la idoneidad y eficacia de los controles ya establecidos. Esto proporciona una base para tomar decisiones sobre el enfoque más apropiado que se debe utilizar para tratar los riesgos. Los resultados de la apreciación del riesgo constituyen datos de entrada para el proceso de toma de decisiones de la organización.

La apreciación del riesgo es el proceso global de identificación, de análisis y de evaluación del riesgo (Figura 6). La manera de aplicar este proceso no solo depende del contexto del proceso de gestión del riesgo, sino también de los métodos y técnicas utilizadas para realizar la apreciación del riesgo.

Figura 6: Contribución de la apreciación del riesgo al proceso de gestión del riesgo [51]

La apreciación del riesgo puede requerir un enfoque multidisciplinario dado que los riesgos pueden cubrir una amplia gama de causas y consecuencias.

Esta Norma describe cómo se pueden seleccionar técnicas para la apreciación del riesgo. Los anexos listan y describen una gama de herramientas y técnicas que se pueden utilizar para realizar una apreciación del riesgo o para ayudar en el proceso de apreciación del riesgo. Algunas veces puede ser necesario emplear más de un método de apreciación.

La apreciación del riesgo se puede realizar con diferentes grados de profundidad y de detalle, y utilizando uno o varios métodos que varían desde simples a complejos. La forma de la apreciación y de sus resultados debería ser consecuente con los criterios de riesgo desarrollados como parte del establecimiento del contexto. El anexo A de la Norma muestra la relación conceptual entre las amplias categorías de técnicas de apreciación del riesgo y los factores presentes en una situación de riesgo dada, y proporciona ejemplos ilustrativos de cómo las organizaciones pueden seleccionar las técnicas apropiadas de apreciación del riesgo para una situación particular.

En términos generales, las técnicas adecuadas deberían tener las siguientes características:

- Deberían ser justificables y apropiadas a la situación u organización que se está considerando.

- Deberían proporcionar resultados de una forma que mejoren la comprensión de la naturaleza del riesgo y de cómo se puede tratar;
- Deberían poderse utilizar de una manera que sea trazable, reproducible y verificable.

Se deberían dar las razones para la elección de técnicas, en cuanto a la importancia y a la idoneidad. Cuando se integran los resultados procedentes de estudios diferentes, las técnicas utilizadas y los resultados deberían ser comparables.

Una vez que se ha tomado la decisión de realizar una apreciación del riesgo, y se han definido los objetivos y el campo de aplicación, las técnicas se deberían seleccionar en base a factores aplicables tales como:

- Los objetivos del estudio. Los objetivos de la apreciación del riesgo tendrán una repercusión directa sobre las técnicas utilizadas. Por ejemplo, si se está realizando un estudio comparativo entre diferentes opciones, puede ser aceptable utilizar modelos de consecuencias menos detalladas para partes del sistema que no se vean afectadas por las diferencias;
- Las necesidades de las personas que han de tomar decisiones. En algunos casos se necesita un alto nivel de detalle para tomar una buena decisión, mientras que en otros es suficiente una comprensión más general;
- El tipo y la gama de riesgos que se analizan;
- La posible magnitud de las consecuencias. La decisión sobre la profundidad con que se ha de realizar la apreciación del riesgo debería reflejar la percepción inicial de las consecuencias (aunque es posible que se tenga que modificar una vez que se haya completado la evaluación preliminar);
- El grado de conocimientos técnicos, y de recursos humanos y de otros tipos que se necesitan. Un método sencillo, bien aplicado, puede proporcionar mejores resultados que un procedimiento más sofisticado pero aplicado deficientemente, en la medida en que cumpla los objetivos y campo de aplicación de la apreciación del riesgo. Por lo general, el esfuerzo que se ponga en la apreciación debería ser consecuente con el nivel potencial del riesgo que se está analizando;
- La disponibilidad de información y de datos. Algunas técnicas requieren más información y datos que otras;
- La necesidad de modificación/actualización de la apreciación del riesgo. En un futuro puede ser necesario modificar/actualizar la apreciación del riesgo, y a este respecto, algunas técnicas son más fáciles de modificar que otras;
- Todos los requisitos contractuales y reglamentarios.

En la selección de un enfoque para la apreciación del riesgo influyen diversos factores, tales como la disponibilidad de recursos, la naturaleza y el grado de incertidumbre de los datos y de la información disponible, y la complejidad de la aplicación.

Las técnicas que se describen en esta Norma para ser aplicadas a la apreciación del riesgo, y su posibilidad de uso en la gestión del riesgo, son las siguientes:

- Tormenta de ideas.
- Entrevistas estructuradas o semiestructuradas.
- Técnica Delphi
- Listas de verificación
- Análisis preliminar de peligros (PHA)
- HAZOP (Análisis de riesgos y de operatividad)
- Análisis de riesgos y puntos de control críticos (HACCP)
- Apreciación de la toxicidad
- Técnica estructurada "y si..." (SWIFT)
- Análisis de escenario
- Análisis de impacto en el negocio (BIA)
- Análisis de la causa raíz (RCA)
- Análisis de los modos de fallo y de los efectos (FMEA) y análisis de los modos de fallos y de los efectos y de la criticidad (FMECA)
- Análisis del árbol de fallos (FTA)
- Análisis del árbol de sucesos (ETA)
- Análisis de causa-consecuencia
- Análisis de causa-y-efecto
- Análisis de capas de protección (LOPA)
- Análisis del árbol de decisiones
- Análisis de la fiabilidad humana (HRA)
- Análisis de pajarita
- Mantenimiento centrado en la fiabilidad
- Análisis de fugas (SA) y análisis del circuito de fuga (SCA)
- Análisis Markov
- Simulación de Monte Carlo
- Estadísticas y redes Bayesianas
- Curvas FN
- Índices de riesgo
- Matriz de consecuencia/probabilidad
- Análisis de costes/beneficios (CBA)
- Análisis de decisión multi-criterios (MCDA)

Para cada una de las técnicas descritas la Norma UNE-EN 31010 se establece una descripción de la técnica, su rango de utilización, Los datos de entrada necesarios para la aplicación de la técnica, una descripción del proceso, los resultados de cada una y las fortalezas y limitaciones de cada métodos. De este modo se establece la aplicabilidad de las herramientas utilizadas para la apreciación del riesgo (Tabla 1).

3.4.9.2. Norma UNE 150008:2008. Análisis y evaluación del riesgo ambiental

La Directiva de Responsabilidad Ambiental [45] incorporada al ordenamiento jurídico nacional por la Ley 26/2007, del 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental, recoge explícitamente el concepto de riesgo, ligándolo a la responsabilidad que el promotor o titular de una actividad tiene con respecto a los potenciales daños ambientales que pudieran derivarse de la misma. Esta Directiva, hace referencia, entre otras cosas, a la conveniencia de “recurrir a procedimientos de evaluación del riesgo ambiental”.

El elemento inspirador para la redacción de la Norma UNE 150008 “Análisis y evaluación del riesgo ambiental” [25] tiene su base en la finalidad última de la evaluación del riesgo ambiental de proporcionar elementos de juicio que orienten a los distintos agentes implicados en la toma de decisiones. La estructura del documento se ha orientado con este objeto, de forma que se han reproducido lo más claramente posible las distintas fases por las que atraviesa el proceso de análisis y evaluación del riesgo ambiental, así como el sentido y el significado de cada una de ellas en la toma de decisiones. Para ilustrar gráficamente dicho proceso, se ha diseñado el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 7, que puede servir como índice u orientación para la lectura e interpretación de la norma.

Esta norma tiene por objeto principal describir el método para analizar y evaluar el riesgo ambiental, así como establecer las bases para una gestión eficaz del mismo y facilitar la toma de decisiones en esta materia, en el ámbito de las empresas, administraciones públicas y otras organizaciones.

Asimismo, esta norma está enfocada también hacia la clarificación de los conceptos y términos usuales en materia de evaluación y otros aspectos de la gestión del riesgo ambiental, facilitando su uso común y la homogeneización de significados.

Por otra parte, la estructura y el contenido de la norma obedecen a la necesidad manifestada por diversos grupos de interés, de establecer un marco de referencia para la posible verificación por tercera parte de estudios sobre el análisis y evaluación del riesgo ambiental en diversas situaciones y actividades.

Tabla 1: Aplicabilidad de las herramientas utilizadas para la apreciación del riesgo [51]

Herramientas y técnicas	Proceso de apreciación del riesgo				
	Identificación del riesgo	Análisis del riesgo			Evaluación del riesgo
		Consecuencia	Probabilidad	Nivel de Riesgo	
Tormenta de ideas.	MA ¹	NA ²	NA	NA	NA
Entrevistas estructuradas o semiestructuradas.	MA	NA	NA	NA	NA
Técnica Delphi	MA	NA	NA	NA	NA
Listas de verificación	MA	NA	NA	NA	NA
Análisis preliminar de peligros (PHA)	MA	NA	NA	NA	NA
HAZOP (Análisis de riesgos y de operatividad)	MA	MA	A ³	A	A
Análisis de riesgos y puntos de control críticos (HACCP)	MA	MA	NA	NA	MA
Apreciación de riesgos ambientales	MA	MA	MA	MA	MA
Técnica estructurada "y si..." (SWIFT)	MA	MA	MA	MA	MA
Análisis de escenario	MA	MA	A	A	A
Análisis de impacto económico	A	MA	A	A	A
Análisis de la causa raíz (RCA)	NA	MA	MA	MA	MA
Análisis de los modos de fallo y efectos	MA	MA	MA	MA	MA
Análisis del árbol de fallos (FTA)	A	NA	MA	A	A
Análisis del árbol de sucesos (ETA)	A	MA	A	A	NA
Análisis de causa-consecuencia	A	MA	MA	A	A
Análisis de causa-y-efecto	MA	MA	NA	NA	NA
Análisis de capas de protección (LOPA)	A	MA	A	A	NA
Análisis del árbol de decisiones	NA	MA	MA	A	A
Análisis de la fiabilidad humana (HRA)	MA	MA	MA	MA	A
Análisis de pajarita	NA	A	MA	MA	A
Mantenimiento centrado en la fiabilidad	MA	MA	MA	MA	MA
Análisis de fugas y análisis circuito de fuga	A	NA	NA	NA	NA
Análisis Markov	A	MA	NA	NA	NA
Simulación de Monte Carlo	NA	NA	NA	NA	MA
Estadísticas y redes Bayesianas	NA	MA	NA	NA	MA
Curvas FN	A	MA	MA	A	MA
Índices de riesgo	A	MA	MA	A	MA
Matriz de consecuencia/probabilidad	MA	MA	MA	MA	A
Análisis de costes/beneficios (CBA)	A	MA	A	A	A
Análisis de decisión multi-criterios (MCDA)	A	MA	A	MA	A
1) Muy aplicable. 2) No aplicable. 3) Aplicable.					

Por ello, esta norma no proporciona herramientas específicas, técnicas para el análisis de riesgos ambientales o algoritmos de cálculo. Asimismo, no establece una definición de términos o requisitos de carácter legal en materia de gestión del riesgo ambiental. Todo ello sin perjuicio de que el legislador pudiera servirse de esta referencia para concretar el método, el alcance, la estructura y el contenido de los informes que en materia de riesgos ambientales fuera preceptivo presentar ante la Administración en el contexto de cualesquiera procedimientos de índole jurídica o administrativa.

Figura 7: Proceso iterativo para identificar, evaluar y gestionar el riesgo ambiental [25]

Esta norma es aplicable a emplazamientos, actividades y organizaciones de cualquier naturaleza y sector productivo, considerados tanto en su conjunto como por unidades de proceso o líneas de negocio individualizadas. Por otra parte, la norma se aplica tanto a emplazamientos concretos como a actividades con múltiples centros o varias ubicaciones,

siempre y cuando entre estos exista un nexo evidente desde el punto de vista de su organización, objeto y unidad de negocio.

La norma sirve de referencia para la elaboración de informes, análisis y evaluaciones del riesgo ambiental en las fases de diseño, construcción, puesta en marcha, operación o explotación, así como para el desmantelamiento o demolición de la instalación.

Esta Norma establece que tanto las actividades como los riesgos rara vez permanecen estáticos a lo largo del tiempo, por lo cual es necesario diseñar y mantener un plan de revisión de todo el proceso de análisis y evaluación de los riesgos ambientales de la organización. La frecuencia y el alcance de dicha revisión deben documentarse y justificarse en virtud de criterios como:

- La complejidad y la peligrosidad intrínseca de la actividad;
- La calidad y la fragilidad del entorno;
- Las expectativas de los grupos de interés relevantes;
- Las modificaciones del entorno legal y normativo aplicable;
- Las modificaciones en los procesos e instalaciones.

Dado que el entorno de una organización es dinámico, y que ello sin duda tiene efectos sobre la estrategia y el conjunto de los factores que afectan al riesgo, la evaluación debe ser un proceso dinámico y revisable. No existen reglas acerca de la frecuencia con la que deben llevarse a cabo ni las evaluaciones, ni el propio análisis. Es evidente que la realización de un nuevo análisis debe implicar forzosamente la realización de una nueva evaluación pero ésta también podrá llevarse a cabo como resultado de analizar los propios resultados del proceso de gestión o porque algunos de los condicionantes del entorno así lo aconsejen.

La norma establece que un análisis de riesgos se compone de dos partes generales:

- Escenarios causales
- Escenarios de consecuencias

Entendidas estos conceptos como la concatenación en el espacio-tiempo de causas por un lado, y consecuencias por otro, que derivan en un accidente concreto con un daño asociado.

El elemento de conexión entre ambos escenarios son los sucesos iniciadores, entendidos como el hecho físico generado por el escenario causal que da lugar a la primera de las consecuencias.

A partir de este esquema, esta norma desarrolla las distintas partes de la metodología del análisis de riesgos, partiendo de este primer análisis conceptual.

La norma establece las bases generales para el análisis y evaluación del riesgo ambiental en los términos siguientes:

- Identificación de causas y peligros, indicando las fuentes de peligro objeto de estudio.
- Identificación de sucesos iniciadores.
- Postulación de escenarios de accidente.
- Asignación de probabilidad del escenario de accidente.
- Estimación de consecuencias asociadas al escenario de accidente.
- Estimación del riesgo.

Para llevar a cabo la identificación de los riesgos inherentes a las actividades industriales se han desarrollado numerosas técnicas. Los propósitos de la aplicación de las técnicas de identificación de escenarios de accidente y situaciones peligrosas pueden ser los siguientes:

- Reconocer las situaciones peligrosas en actividades en las que se manejan materiales que implican riesgos, con objeto de revisar el diseño y establecer medidas correctivas o preventivas;
- Identificar los escenarios de posibles accidentes, con el fin de evaluarlos y cuantificarlos en un análisis de riesgos;
- La correcta identificación de escenarios no sólo permitirá tener un fiel reflejo de los aspectos de seguridad propios de la instalación, sino que además permitirá eliminar los puntos más conflictivos.

Tras la estimación del riesgo y con anterioridad a las siguientes etapas del proceso de gestión del riesgo, es preciso proceder a su evaluación.

La evaluación es el proceso mediante el cual, a la vista de los resultados del análisis del riesgo realizado, y de una serie de criterios o factores endógenos y exógenos no aplicados durante el propio análisis y que actúan como condicionantes, la organización emite un juicio acerca de la tolerabilidad del riesgo y por tanto de su aceptabilidad. Es un proceso de reflexión y análisis que implica necesariamente la toma de decisiones al respecto.

Es preciso aclarar que los criterios sobre los que se decide la tolerabilidad del riesgo no son solamente los relacionados con los límites legales, sino que hay que tener en cuenta también aquellos relacionados con la combinación de componentes políticos, económicos, sociales, tecnológicos, científicos, culturales y éticos.

Entre los criterios que pueden formar parte del proceso de evaluación se encuentran:

- Los factores de tipo social y particularmente los de carácter legal expresados tanto en datos actuales como en tendencias;
- La propia estrategia de negocio de la compañía, así como sus valores y conducta expresados en misión, visión y otros códigos, políticas o manuales;
- Las necesidades o expectativas de las partes interesadas previamente seleccionadas en el alcance del análisis de riesgos;

- Los aspectos económicos y financieros, tanto del global de la organización, como los particularmente derivados de la reducción del riesgo a aplicar;
- La disponibilidad o madurez de la tecnología o del equipamiento a utilizar para reducir o eliminar el riesgo.

La evaluación debería proporcionar como resultado un documento que contenga los resultados finales de los trabajos de preparación, la deliberación y las conclusiones del proceso, con evidencia expresa de los agentes de la organización que han intervenido y la correspondiente aprobación por parte de sus máximos representantes.

El proceso de análisis y evaluación de riesgos lleva asociado un cierto grado de incertidumbre que puede deberse a diversas fuentes como, por ejemplo, la falta de conocimiento científico, la variabilidad propia del medio ambiente, la asignación de valores de probabilidad del suceso, las simplificaciones de la realidad asumidas en los modelos de estimación de efectos y consecuencias, la calidad de los datos de entrada introducidos en dichos modelos, etc.

Es importante, por lo tanto, identificar las distintas fuentes de incertidumbre y su contribución a la estimación final del riesgo, con objeto de que la evaluación de riesgos se pueda aplicar eficazmente como mecanismo de gestión.

En general, la evaluación de incertidumbres suele realizarse de manera cualitativa, indicando la influencia de dichas incertidumbres en la estimación final del riesgo en función del conocimiento de los modelos aplicados, del medio, etc.

Sin embargo, cuando el grado de incertidumbre es crítico se debe realizar un análisis de sensibilidad de manera que los resultados se puedan expresar dentro de un límite de confianza.

En su conjunto, la gestión del riesgo tiene como objeto principal la toma de las decisiones más adecuadas sobre los riesgos ambientales, fundamentadas en los criterios de seguridad y eficiencia económica. En este marco y por más que sea imprescindible, el análisis y la evaluación no es un fin en sí mismo, sino sólo una fase inicial del proceso de gestión del riesgo.

Entendido en su conjunto, tal proceso incluye también:

- El tratamiento de los distintos riesgos evaluados, tanto en lo que se refiere a sus aspectos financieros (transferencia al mercado asegurador, financiación, retención), como técnicos (implementación de medidas y sistemas para su eliminación, reducción y control), y
- La comunicación adecuada con los grupos de interés relevantes a lo largo de todo el proceso.

3.4.9.3. UNE 150011:2005. Gestión ambiental. Guía para la evaluación de los costes ambientales. Costes ambientales internos

La Norma “UNE 150011:2005. Gestión ambiental. Guía para la evaluación de los costes ambientales. Costes ambientales internos” [52], que se comenta en este capítulo, facilita la elaboración de información contable obligatoria y voluntaria, pública y confidencial, pues permite identificar y, cuando es posible, medir y valorar los costes ambientales, a fin de facilitar y controlar la toma de decisiones estratégicas, tácticas y operativas relativas a las relaciones de cada organización con sus variables ambientales.

Los esfuerzos que realizan las organizaciones en el ámbito de prevenir, reducir y, cuando es posible, eliminar el impacto ambiental generado por la actividad humana y para promover un desarrollo sostenible, suelen reflejar sus fortalezas y debilidades, así como las oportunidades y amenazas de los nuevos escenarios competitivos y afectan no solo a la propia organización sino también a todos sus grupos de interés (inversores en capital propio y ajeno, proveedores, clientes, competidores, trabajadores, administración pública, público en general, etc.).

Todo ello tiene asociados unos costes cuyo reconocimiento, valoración, gestión y control son heterogéneos, y en ocasiones, muestran unos claros efectos económicos, financieros, fiscales, laborales, etc., por reflejar variables estratégicas claves.

Además, teniendo en cuenta la demanda creciente de información contable en relación con el medio ambiente de las diferentes partes interesadas, se ha desarrollado una norma UNE que permita a cualquier organización, identificar sus costes ambientales, cuantificarlos si es necesario e incorporarlos a su sistema de información contable, facilitando tanto su control como el cumplimiento de las normativas contables aplicables.

En esta norma se diferencian tres tipos de información contable sobre el comportamiento de los costes ambientales y otros aspectos relacionados de una organización (Figura 8):

- Información para uso interno de la organización. Frente a los otros tipos de información, ésta es una información de difusión restringida frente a otros tipos de información.
- Información pública en las Cuentas Anuales.
- Otra información pública voluntaria.

Con carácter general, según se indica en la Figura 8, el coste ambiental se define como el sacrificio o disminución experimentada en el bienestar de las personas o en valor de los bienes, tanto de la organización como ajenos a ella, relacionado con el impacto ambiental de las actividades de dicha organización en un periodo de tiempo.

Por tanto, el coste ambiental expresa la valoración de los recursos ambientales de la organización, a partir de los principios de sacrificio y acumulación, pudiendo diferenciar entre los recursos ambientales que son de propiedad exclusiva de dicha organización y otros

recursos ambientales cuya propiedad es común y por tanto la organización de referencia es tan sólo uno de sus múltiples propietarios. La aplicación de los principios de sacrificio y acumulación a los recursos ambientales propiedad de la organización es similar a su aplicación a cualquier otro de sus recursos económicos. Cuando la propiedad es común, además de su valoración al coste privado, por el sacrificio realizado por la organización, ha de tomarse en consideración el coste social derivado del sacrificio realizado por el resto de los propietarios de dicho recurso.

Figura 8: Costes ambientales [52]

Con este criterio, es posible diferenciar entre costes ambientales que la organización integra en su información económico-financiera y aquellos que la organización no refleja en dicha información. Estos últimos están excluidos de esta norma destinada exclusivamente a los costes ambientales, cuantificados o no, que la organización internaliza.

A efectos del sistema de información contable de una organización, el coste ambiental se define como el consumo, necesario y debidamente valorado, de factores de producción relacionados con:

- Los recursos naturales necesarios para la producción (de bienes y de servicios);
- La asimilación por el entorno natural de desechos de las actividades de producción y consumo;
- El conjunto de bienes y servicios ambientales que se orientan a las necesidades vitales y de calidad de vida del ser humano.

Esta norma UNE desarrolla un soporte teórico, basado en el modelo de marco conceptual que vienen aplicando los principales organismos de normalización contable y que tiene por objeto dotar de sustento racional a la implantación de estrategias y sistemas de dirección, información y control. Dicho soporte teórico obedece al esquema de la Figura 9.

Figura 9: Marco conceptual de la Norma UNE 150011.2005 [52]

Los costes ambientales, igual que cualquier otro tipo de coste, pueden ser medidos y clasificados atendiendo a criterios como su naturaleza, su función, su relación con los objetos de coste, el volumen de actividad, la adopción de decisiones, el control, etc. Todas estas clasificaciones son compatibles entre sí y se completan con las que figuran a continuación específicamente diseñadas para los costes ambientales:

- En función de su frecuencia:

Costes ambientales ordinarios, que se derivan de las operaciones corrientes y la organización soporta de forma habitual.

Costes ambientales extraordinarios, cuya frecuencia es baja y por tanto son esporádicos en la organización.

- En función de las actividades que los generan:

Costes de prevención, relacionados con el aseguramiento de la calidad ambiental en la organización, incluyendo los costes de análisis y evaluación (que permiten determinar la posición de la organización respecto al medio ambiente).

Costes de efectos no deseados en los que se incurre al generar daños ambientales externos y que no tengan la consideración de pérdidas. Dentro de ellos, los más significativos suelen ser los costes derivados de las actividades de gestión de residuos y vertidos y los costes por descontaminación y restauración.

- En función de su relación con el ciclo de vida de un proyecto:

Costes ambientales comunes a todas las fases del proyecto derivados de exigencias administrativas, responsabilidades, imagen, relaciones externas e internas, planificación y presupuesto ambiental, componente ambiental de los costes convencionales, etc.

Costes de diseño y apertura: como los costes ambientales ocasionados por los estudios ambientales para la localización y emplazamiento de instalaciones, la construcción de nuevos emplazamientos, corrección, recuperación y compensación, protección del paisaje y hábitats, etc.

Costes de operación y explotación: equipos y sistemas de control ambiental, eco-etiquetado, certificación ambiental, análisis del ciclo de vida, estudios de viabilidad ambiental, etc.

Costes de desmantelamiento y cierre: clausura de instalaciones, eliminación, recuperación, inspección, vigilancia y mantenimiento de la zona, etc.

3.4.9.4. UNE 22480:2008. Sistema de gestión minera sostenible. Requisitos

La Norma UNE 22480:2008 [53] especifica los requisitos para un sistema de gestión minera sostenible, destinados a permitir que una organización desarrolle un sistema para la mejora continua en el desempeño de los criterios de sostenibilidad, que tenga en cuenta los requisitos legales y otros requisitos y la información relativa a aspectos de sostenibilidad significativos que la organización suscriba, independientemente del tipo de actividad minera.

Esta norma es de aplicación a las actividades de exploración, investigación, extracción propiamente dicha, preparación y beneficio de minerales, aprovechamientos de los residuos originados en las actividades mineras y a las derivadas de la minería (rehabilitación, recuperación, acondicionamiento y mantenimiento de las infraestructuras, depósitos o terrenos).

Es válida/aplicable para aquellos aspectos que la organización identifica que afectan al desempeño de la gestión minera sostenible y sobre los cuales la organización pueda controlar y tener influencia.

Es aplicable a cualquier organización que desee:

- Mejorar la eficiencia de sus procesos de forma sistemática.
- Establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión minera sostenible.
- Asegurar la conformidad con su política del sistema de gestión minera sostenible.
- Demostrar esta conformidad a otros.
- Buscar la certificación de su sistema de gestión minera sostenible por una organización externa.

El sistema de gestión desarrollado en esta norma es independiente y compatible con otros sistemas de gestión existentes.

El Sistema de Gestión Minera Sostenible se ha basado en el ciclo de mejora continua Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA) y es compatible con otros sistemas de gestión que las organizaciones dispongan. La Figura 10 representa el ciclo de mejora continua del sistema de gestión minera sostenible.

Figura 10: Modelo de sistema de gestión minera sostenible [53]

Como requisito general se establece que la organización debe establecer, documentar, implantar, mantener y mejorar de forma continua un sistema de gestión minera sostenible de acuerdo con los requisitos de esta norma, y determinar cómo se dará cumplimiento a estos requisitos.

Del mismo modo, la organización debe definir y documentar el objeto y alcance de su sistema de gestión minera sostenible.

Esta Norma establece a su vez una serie de requisitos en cuanto a planificación, implantación y funcionamiento, así como en cuanto a seguimiento, evaluación y medidas correctivas a adoptar en el proceso de adopción y mantenimiento del sistema para la mejora continua en el desempeño de los criterios de sostenibilidad.

Entre todos los requisitos destaca la necesidad de definición de medidas de los impactos o efectos causados por la organización, en forma de indicadores medibles y cuantificables, para poder establecer la correcta implantación del sistema de gestión y los puntos susceptibles de modificación o mejora en caso de ser necesario.

Así, la Norma UNE 22480:2008 establece que la organización debe establecer, implementar y mantener uno o varios procedimientos para identificar aquellos indicadores de gestión minera sostenible que son aplicables a su organización y sobre los que tenga control y/o influencia, implantar aquellos identificados, disponiendo de información suficiente de cada uno de ellos; y determinar cuáles de aquellos implantados tienen mayor margen de mejora con el fin de identificarlos como prioritarios a la hora de establecer objetivos y metas del sistema de gestión minera sostenible.

Los requisitos establecidos en esta Norma se enumeran de manera temática en la Tabla 2.

Tabla 2: Temática de los requisitos del Sistema de Gestión Minera Sostenible (Creado a partir de [53])

REQUISITOS DEL SISTEMA DE GESTIÓN MINERA SOSTENIBLE	Requisitos generales	
	Política del Sistema de Gestión Minera Sostenible	
	Planificación	Identificación, implementación y evaluación de los indicadores
		Requisitos legales
		Objetivos, metas y programas
	Implantación y funcionamiento	Recursos, funciones, responsabilidad y autoridad
		Competencia, formación y toma de conciencia
		Comunicación
		Documentación del sistema de gestión minera sostenible
		Control de documentos
		Control de las operaciones
		Preparación y respuesta ante emergencias
	Examen y medidas correctivas	Seguimiento y medición
		Evaluación del cumplimiento legal
		No conformidad, acción correctiva y acción preventiva
		Control de los registros
		Auditorías internas de los sistemas de gestión minera sostenible
	Revisión por la dirección	

3.4.9.5. Norma UNE 22470:2008. Indicadores de gestión minera sostenible

La Norma UNE 22470:2008 [54], tiene por objeto establecer los indicadores de tipo social, económico y ambiental para la evaluación de la implantación de un sistema de gestión minera sostenible, bajo los requisitos establecidos en la Norma UNE 22480:2008, descrita anteriormente.

Esta norma es de aplicación a las actividades de exploración, investigación, extracción propiamente dicha, preparación y beneficio de minerales, aprovechamientos de los residuos originados en las actividades mineras y las derivadas de la minería (rehabilitación, recuperación, acondicionamiento y mantenimiento de las infraestructuras, depósitos o terrenos).

Es esta Norma se establece que los criterios con los que se debe evaluar la gestión minera sostenible son los siguientes:

- Seguridad de suministro para la satisfacción de la demanda del producto en un entorno próximo, medio o lejano.
- Utilización eficiente de los recursos naturales.
- Aplicación de medidas para promover y mejorar la seguridad y salud de los trabajadores.
- Contribución al desarrollo económico de la comunidad.
- Contribución al desarrollo social de la comunidad.
- Rehabilitación del espacio natural afectado.
- Aplicación de las mejores técnicas disponibles en la prevención y control integrados de la contaminación así como en la gestión de residuos.

Los criterios se desarrollan en indicadores que pueden ser cuantitativos, descriptivos o mixtos.

Los indicadores se agrupan según las tres dimensiones del conjunto convencional de sostenibilidad: la económica, la social y la ambiental.

Los indicadores centrales (C) son, en términos generales, aquellos que tienen más interés para la mayoría de las empresas y más relevancia para las partes interesadas.

Los indicadores adicionales (A) son aquellos que representan unas prácticas destacadas en la medición de los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales y ofrecen información de interés a ciertas partes interesadas y cuya implantación se considera aconsejable para que en el futuro pasen a la categoría de indicadores centrales.

La Norma UNE 22470:2008 establece una serie de parámetros, divididos en función del ámbito al que pertenecen (económico, social o medioambiental) que se detallan en la Tabla 3 y la Tabla 4.

Tabla 3: Tipos de indicadores y parámetros propuestos en la Norma UNE 22470:2008 [54]

INDICADORES	Tipo de indicador		Parámetro
	ECONÓMICOS	Gestión económica	Producción anual vendida (C)
			Ventas netas anuales (C)
			Ayudas financieras de las Administraciones Públicas (A)
		I+D	Inversión en I+D (C)
		Consumibles	Consumibles en la extracción y tratamiento de recursos minerales (C)
	SOCIALES	Comunicación con la Comunidad Local	Valor monetario de las contribuciones en forma de donaciones de la empresa a la comunidad (C)
			Índice de respuesta social (A)
			Actividades puestas en marcha por la empresa que promueve la implicación de la comunidad (C)
			Inversiones en actividades de interés público, social o de interés para la comunidad (A)
			Consumibles en el ámbito local (A)
			Servicios en el ámbito local (A)
		Empleo	Empleo total directo (C)
			Empleo total indirecto (C)
			Índice de estabilidad en el empleo (A)
			Mano de obra local (A)
		Formación	Formación anual (C)
			Inversión en formación (A)
		Seguridad y salud de los trabajadores	Índice de frecuencia (C)
			Índice de incidencia (C)
			Índice de gravedad (C)
			Duración media de las bajas (C)

Tabla 4: Tipos de indicadores y parámetros propuestos en la Norma UNE 22470:2008 (Continuación) [54]

	Tipo de indicador		Parámetro
INDICADORES	AMBIENTALES	Protección ambiental	Gasto total en medio ambiente (C)
		Eficiencia energética en el proceso productivo	Consumo directo de energía en el proceso productivo (C)
			Consumo de energía procedente de fuentes renovables (A)
		Demanda de agua	Consumo neto de agua primaria (C)
			Consumo de agua reciclada (A)
		Demanda de suelo	Superficie afectada por la actividad minera (C)
			Volumen afectado por la actividad minera (A)
			Superficie total rehabilitada a final de año (C)
		Uso de sustancias peligrosas	Sustancias muy tóxicas y tóxicas para el ser humano y los organismos vivos utilizados en el proceso productivo (A)
			Sustancias nocivas para el ser humano y/o que pueden provocar a largo plazo efectos negativos para el medio ambiente utilizadas en el proceso productivo (A)
		Residuos	Residuos mineros inertes vertidos en escombreras, balsas o presas (C)
			Residuos mineros no peligrosos no inertes vertidos en escombreras, balsas o presas (C)
			Residuos mineros peligrosos vertidos en escombreras, balsas o presas (C)
			Productos intermedios en acopio temporal (A)
			Residuos mineros reutilizados y/o reciclados y/o valorizados y/o empleados en la restauración (C)
			Residuos industriales generados en el proceso productivo (C)
		Incidentes medioambientales	Incidentes medioambientales documentados (A)

3.4.9.6. UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia

La Norma UNE-EN ISO 14040:2006 [36], que de manera no exhaustiva se describe a continuación, establece el marco para la aplicación del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de modo que se establezcan los principios para conocer los impactos ambientales asociados con productos y servicios, tanto manufacturados como consumidos, de modo que puedan gestionarse de la manera más adecuada en cada caso.

Esta norma internacional describe los principios y el marco de referencia para el análisis del ciclo de vida (ACV) incluyendo:

- La definición del objetivo y el alcance del ACV,
- La fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV),
- La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV),
- La fase de interpretación del ciclo de vida,
- El informe y la revisión crítica del ACV,
- Las limitaciones del ACV,
- La relación entre las fases del ACV, y
- Las condiciones de utilización de juicios de valor y de elementos opcionales.

Esta norma internacional comprende los estudios del análisis del ciclo de vida (ACV) y los estudios de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV). No describe la técnica de ACV en detalle, ni especifica metodologías para las fases individuales del ACV.

El ACV considera el ciclo de vida completo de un producto, desde la extracción y adquisición de la materia prima, pasando por la producción de energía y materia, y la fabricación, hasta el uso y el tratamiento al final de la vida útil y la disposición final. A través de esta visión general y perspectiva sistemática, se puede identificar y posiblemente evitar el desplazamiento de una carga ambiental potencial entre las etapas del ciclo de vida o los procesos individuales.

El ACV trata los aspectos e impactos ambientales de un sistema del producto. Los aspectos e impactos económicos y sociales, generalmente están fuera del alcance del ACV. Se pueden combinar otras herramientas con el ACV para análisis más profundos.

Los estudios de ACV se componen de cuatro fases. La relación entre las fases se ilustra en la Figura 11. Estas son:

- La definición del objetivo y el alcance,
- El análisis del inventario,
- La evaluación del impacto, y
- La interpretación.

Figura 11: Etapas de un Análisis de Ciclo de Vida [36]

La fase de evaluación de impacto de un ACV tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del ICV. En general, este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con los indicadores de esas categorías para entender estos impactos. La fase de la EICV también proporciona información para la fase de interpretación del ciclo de vida.

La evaluación del impacto puede incluir un proceso iterativo de revisión del objetivo y del alcance del estudio de ACV para determinar si se han cumplido los objetivos del mismo, o para modificar el objetivo y el alcance si la evaluación indica que no se pueden alcanzar.

Cuestiones tales como la elección, el modelado y la evaluación de categorías de impacto pueden introducir subjetividad en la fase de la EICV. Por lo tanto, la transparencia es crítica en la evaluación del impacto a fin de asegurar que las suposiciones están claramente descritas e informadas.

La EICV trata solamente los asuntos ambientales especificados en el objetivo y el alcance. Por lo tanto, la EICV no es una evaluación completa de todos los asuntos ambientales del sistema del producto bajo estudio.

La EICV no siempre puede demostrar diferencias significativas entre las categorías de impacto y los resultados de sus indicadores correspondientes para diferentes alternativas de los sistemas del producto. Esto puede deberse a:

- Un desarrollo limitado de los modelos de caracterización, de los análisis de sensibilidad y de incertidumbre para la fase de la EICV,

- Limitaciones de la fase de ICV, tales como el establecimiento de los límites del sistema, que no incluyen todos los procesos unitarios posibles para un sistema del producto o no incluye todas las entradas y salidas de cada proceso unitario, ya que hay cortes y vacíos en los datos,
- Limitaciones de la fase de ICV, tales como una calidad inadecuada de los datos del ICV, que puede originarse, por ejemplo, por las incertidumbres o las diferencias en los procedimientos de asignación y de agregación, y
- Limitaciones en la recopilación de los datos de inventarios adecuados y representativos para cada categoría de impacto.

La ausencia de dimensiones espaciales y temporales en los resultados del ICV introducen incertidumbre en los resultados de la EICV. La incertidumbre varía según las características espaciales y temporales de cada categoría de impacto.

No hay metodologías aceptadas de manera general para asociar de forma coherente y exacta los datos de inventario con los impactos ambientales potenciales específicos. Los modelos de categorías de impacto se encuentran en diferentes etapas de desarrollo.

3.4.9.7. UNE 157921:2006. Criterios generales para la elaboración de estudios de impacto ambiental

La Norma “*UNE 157921:2006. Criterios generales para la elaboración de estudios de impacto ambiental*” [26], que se describe de manera no exhaustiva a continuación, es aplicable a los estudios de impacto ambiental que formen parte de los proyectos y puede servir de orientación en la redacción de los estudios de impacto ambiental de los planes y programas.

Esta norma tiene por objeto establecer las características que deben satisfacer los estudios de impacto ambiental, para:

- Prever y determinar las consecuencias ambientales de un Proyecto;
- Determinar las medidas protectoras y correctoras;
- Planificar o programar la vigilancia ambiental del Proyecto;
- Facilitar la evaluación ambiental de los proyectos;
- Proveer la información necesaria cuando proceda formular la declaración de impacto ambiental, la autorización ambiental integrada u otros procedimientos administrativos de evaluación o registro del mencionado Proyecto.

No es objeto de esta norma determinar la metodología y las técnicas de elaboración del estudio de impacto ambiental.

El mayor o menor desarrollo de los aspectos indicados en esta norma dependerá del tipo de Proyecto de que se trate.

Una de las medidas fundamentales para utilizar racionalmente los recursos naturales, establecer los criterios para la prevención y control integrados de la contaminación, conservar, proteger la calidad del medio ambiente y, en consecuencia, mejorar la calidad de vida de las personas, es aplicar el principio de cautela a los planes, programas y proyectos mediante la redacción de los correspondientes estudios de impacto ambiental.

Debido al extraordinario aumento de los proyectos que requieren la elaboración de un estudio de impacto ambiental, se hace necesaria la existencia de un proceso de normalización de los mismos, cuyo objeto es facilitar y homogenizar su realización así como su evaluación y valoración por quien proceda.

El Estudio de Impacto Ambiental (EIA) se define como cualquier cambio en el medio ambiente, sea adverso o beneficioso, resultante en todo o en parte de las acciones derivadas de las diferentes fases de construcción, explotación, mantenimiento y, en su caso, clausura, cese o desmantelamiento de la actividad objeto del proyecto. El cambio se mide por la variación del estado de los factores ambientales a lo largo del tiempo, con o sin el proyecto.

Dentro de esta Norma se establecen los contenidos que debe tener un EIA y que pueda ser interpretado correctamente por profesionales distintos de los que lo han redactado:

Los documentos y estructura que debe tener un EIA son los siguientes:

I. Índice General

II. Memoria

0. Hojas de identificación

- Hoja de datos
- Hoja índice

1. Objeto

2. Antecedentes administrativos

3. Alcance

4. Normas y referencias

- Disposiciones legales y normas aplicadas
- Bibliografía
- Métodos
- Otras referencias

5. Definiciones y abreviaturas

6. Descripción de las necesidades que suscitan la redacción del Proyecto y del estudio de impacto ambiental

7. Análisis de alternativas previas relacionadas con planes y programas

8. Descripción general del Proyecto y de las soluciones adoptadas

9. Descripción del medio

10. Análisis de alternativas factibles

11. Identificación y valoración de los impactos de las alternativas estudiadas

- Detección e identificación de los impactos del Proyecto
- Caracterización y valoración de los impactos
- 12. Medidas protectoras, correctoras o compensatorias para cada una de las alternativas estudiadas
- 13. Valoración de impactos residuales después de aplicar medidas protectoras correctoras y compensatorias. Justificación de la solución adoptada.
- 14. Programa de vigilancia ambiental
- 15. Orden de prioridad entre los documentos básicos
- III. Documento de síntesis**
- IV. Anexos**
 - 1. Documentación de partida
 - 2. Cálculos
 - 3. Reportaje gráfico de la zona afectada
 - 4. Otros documentos
- V. Planos y documentación gráfica**
- VI. Valoración económica**
- VII. Pliego de condiciones (opcional)**

3.5. Aplicación de la Normativa al desarrollo de las actividades mineras

La Directiva 2004/35/CE [45] establece en su ámbito de aplicación que se aplicará la responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales a las actividades que, entre otras, impliquen la gestión de residuos peligrosos. Esta Directiva Europea fue traspuesta a la legislación española por medio del desarrollo de la Ley 26/2007 , de Responsabilidad Medioambiental [46], que fue desarrollada por el R.D. 2090/2008 [48].

En las citadas referencias se habla expresamente sobre la aplicación expresa de todas ellas a la Minería, bien como fuente de generación de impactos, bien como proceso generador de residuos que deben gestionarse de manera adecuada. A este último respecto, la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados [50] hace referencia a la categorización de los residuos de explotaciones mineras como residuos peligrosos, por lo que también es de aplicación la reglamentación aplicable sobre residuos.

Además, la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental [23], establece expresamente los proyectos de industrias extractivas que deben someterse a la evaluación ambiental ordinaria regulada en dicha Ley.

Por todo ello, queda fundamentada la inexcusable aplicación de la normativa medioambiental a los proyectos de explotación de los recursos minerales, y la necesidad del desarrollo de todas

las técnicas aplicables a los citados proyectos, así como la necesidad de ampliar los trabajos de investigación aplicada para una mejor gestión de los impactos ambientales generados por actividades mineras y el establecimiento de cuantos modelos sean oportunos para posibilitar la cobertura de la amplia variabilidad de escenarios que pueden presentarse.

De hecho, existen herramientas para llevar a cabo un análisis del riesgo ambiental a nivel sectorial, como son las establecidas en el R.D: 2090/2008, donde se facilite la evaluación de los diferentes escenarios y situaciones que pueden tener lugar en una determinada actividad [46, 48].

Es cada sector profesional o grupo de actividades el que decide el tipo de instrumento a partir del cual podrá apoyarse para analizar su riesgo medioambiental a nivel sectorial, pudiendo optar entre una tabla de baremos, un modelo de informe de riesgos ambientales tipo el llamado MIRAT, o bien, una guía metodológica, según el grado de homogeneidad del grupo de operadores que pertenezcan al mismo sector profesional desde el punto de vista del riesgo medioambiental. Los modelos MIRAT y las tablas de baremos se aplicarán cuando las distintas actividades que integran un mismo sector lleven asociada una alta homogeneidad. En otras palabras, se llevará a cabo una guía metodológica cuando la heterogeneidad de las actividades que componen un mismo sector no permita la homogeneización de sus escenarios de riesgo medioambiental.

En virtud de estas premisas, en octubre de 2012, la Comisión Técnica de Prevención y Reparación de Daños Medioambientales de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Medio Natural, dependiente del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, publicó el “Proyecto Piloto de Guía Metodológica. Sectores: Minería de sulfuros polimetálicos y minería de sales sódicas y potásicas” [55], por el cual se pretende dar respuesta a los requerimientos legales expuestos.

El objetivo de este informe [55] es desarrollar una guía metodológica (en adelante, GM) dirigida al sector de la minería metálica no energética, concretamente, a la minería de sulfuros polimetálicos y a la minería de sales sódicas y potásicas. Este sector está sujeto al régimen objetivo de responsabilidad medioambiental, al estar afectado por el ámbito de aplicación de la legislación que se cita en los apartados 1.b, 3, 4, 6, 7, 8, 10 y 14 del anexo III de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, relacionada mayoritariamente y, entre otros aspectos, con la presencia de sustancias peligrosas en el proceso productivo, con la captación de aguas, las operaciones de vertido y con la gestión de residuos procedentes de la industria extractiva.

La Orden Ministerial ARM/1783/2011 establece, para este tipo de actividades extractivas, un plazo entre cinco y ocho años para la elaboración de las órdenes ministeriales por las que se fijará la fecha a partir de la cual será exigible la garantía financiera obligatoria.

El alcance o tipo de operadores a los que va dirigida esta GM viene determinado por las empresas cuyas instalaciones han participado en el estudio dos empresas mineras de sulfuros polimetálicos y una de sales sódicas y potásicas. El desarrollo y tipo de riesgos

medioambientales que se han abordado en el estudio se relacionan exclusivamente con estas instalaciones, razón por la cual no es posible afirmar que para otras instalaciones del sector estén contemplados todos los factores de riesgo medioambiental que son relevantes a efectos de la Ley 26/2007. Esta limitación se relaciona con el hecho de que existe una alta variabilidad en el comportamiento de las explotaciones que componen el sector en cuanto a factores que describen su riesgo medioambiental, tales como el tipo y la complejidad del proceso productivo, la capacidad de tratamiento, la ubicación geográfica, y el tipo y cantidad de emisiones a las aguas y a la atmósfera.

Esta GM establece una serie de orientaciones técnicas a nivel sectorial destinadas a homogeneizar y unificar el contenido de los análisis de riesgos que deberán realizar los operadores a título individual para su valoración particularizada del riesgo; paso previo necesario para estimar la cobertura del daño que, en su caso, deberá cubrir la garantía financiera por responsabilidad medioambiental. A tal fin la GM contiene las directrices generales a seguir para realizar el análisis del riesgo medioambiental según el tipo de explotación de la que se trate ☐ sulfuros polimetálicos o de sales sódicas y potásicas y la tipología de las instalaciones o subactividades de cada explotación, identificando las variables y factores a tener en consideración para dicho análisis.

Las directrices técnicas que ofrece la GM se presentan en dos formas diferentes:

- Catálogos que exponen una relación de los aspectos que pueden intervenir en el análisis de los escenarios accidentales a nivel individual. Se incluye un catálogo para las siguientes etapas o elementos del análisis del riesgo medioambiental que deberán ser analizados a nivel de operador: las actividades o zonas con peligro asociado, los sucesos iniciadores y sus causas, los factores condicionantes que pueden participar en los escenarios accidentales y los tipos de receptores afectados en cada caso. Cada uno de estos catálogos ofrece una «check-list» con los aspectos que se han identificado a nivel sectorial para cada etapa o elemento del análisis de riesgos, con la idea de que el operador identifique entre dichos aspectos aquéllos que se presentan o pueden afectar a su explotación particular.
- Protocolos que describen los pasos que el analista podrá realizar para llevar a cabo las etapas del análisis del riesgo medioambiental que llevan asociada una mayor complejidad técnica. Dichos protocolos estarán dirigidos a:
 - a. Estimar la probabilidad asociada a la ocurrencia de cada escenario accidental.
 - b. Cuantificar los daños asociados a cada escenario accidental en términos de intensidad, extensión y temporalidad de los efectos que el agente causante del daño pueda ocasionar sobre el medio receptor.
 - c. Evaluar la significatividad o relevancia de dichos escenarios de riesgo.
 - d. Valorar económicamente el daño medioambiental asociado a cada escenario accidental.

3.6. Dificultades de aplicación de la Legislación. Falta de criterios de comparación

La aplicación de cualquier tipo de “análisis ambiental”, a cualquier proyecto, en su sentido más amplio, bien sean Estudios de Impacto ambiental, Análisis de Ciclo de Vida o cualquier otro, pasa por la necesidad de un conocimiento exhaustivo del proceso productivo en cuestión. Este aspecto puede considerarse objetivo y pasa por un análisis descriptivo de todas las fases o etapas de las que consta. Sin embargo entra en juego también la experiencia del grupo de trabajo que desarrolla el análisis [56, 57]. En muchas ocasiones, estos grupos de trabajo no cuentan con expertos en el proceso que está estudiando [12].

Por otro lado, si bien existen ciertos marcos de referencia, la valoración de la afección del proceso productivo al medio ambiente pasa por una interpretación subjetiva ya que existen condicionantes externos al proyecto que harán que un mismo proceso genere un mismo efecto en el medio ambiente, pero en función de, por ejemplo, la ubicación del proyecto, la presencia de núcleos urbanos más o menos cercanos, presencia de espacios ambientalmente sensibles cercanos, hagan que un efecto sea tolerable en mayor o menor medida que ese mismo efecto en otra ubicación. Además, cuando se está hablando de afecciones a las personas, entra en juego la idea de “percepción del riesgo” [30, 58], siendo éste, por definición, un concepto subjetivo.

No es posible olvidar que durante el desarrollo de los estudios y análisis ambientales existen diferentes partes involucradas, con intereses diferentes o incluso contrapuestos que hacen que ciertas opiniones puedan ser consideradas de mayor calado que otras [29, 56]. También es cierto que durante el desarrollo de proyectos de envergadura, como pueden ser los proyectos de explotación de recursos minerales, entren en juego diferentes grupos de trabajo para el desarrollo de estudios de pre-viabilidad, de viabilidad, Ingeniería básica ingeniería de detalle, etc. que pudieran dar lugar a puntos de vista diferentes, motivados no por falta de experiencia o formación, sino porque tienen unos objetivos diferentes en función de la fase del proyecto en la que entran en juego.

Además, es importante señalar que el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental no garantiza que un proyecto no será modificado o rechazado si el proceso revela que habrá impactos ambientales serios. En algunos países, un tomador de decisiones puede, de hecho, elegir la alternativa ambientalmente más dañina siempre y cuando las consecuencias sean presentadas en la EIA. En otras palabras, el proceso de la EIA asegura una decisión informada, no necesariamente una decisión ambientalmente beneficiosa [29]. En estos casos, será la autoridad competente la que autorice o rechace la solución adoptada, una vez evaluados los informes presentados.

Estas consideraciones que se han detallado son las existentes para un único proyecto. Sin embargo, los problemas planteados se acentúan cuando dos proyectos coexisten en una mismo área y afectan sobre un mismo lugar [59-61]. Está estudiado que no existe un método estándar para evaluar los impactos acumulativos [29]. En esta situación se puede dar la circunstancia que se tengan dos proyectos en los cuales los análisis ambientales los llevan a cabo dos grupos de trabajo diferentes y que el punto sensible sea el mismo. En este escenario, las subjetividades dan lugar a que no sea posible conocer la afección ambiental real sobre un mismo punto (Figura 13). Se puede decir que hay “impactos directos”, que son relativamente fáciles de identificar, pero una predicción de los “impactos indirectos”, como pueden ser los impactos acumulativos, pueden ser mucho más problemáticos [17].

La naturaleza de los impactos acumulativos en regiones con recursos naturales depende de la extensión y de qué tipos de extracción de recursos es dominante así como del grado de homogeneidad del producto extraído. Una aparente conclusión que puede obtenerse es que también se requiere la diferenciación entre los tipos de impactos, que pueden ser agregados y acumulados) y su resultado en forma de efectos acumulativos. Según su definición, "los impactos acumulativos son los impactos sucesivos, incrementales y combinados (tanto positivos como negativos) de una o más actividades en la sociedad, la economía y el medio ambiente", donde los impactos acumulativos "resultan de la agregación y la interacción de los impactos sobre un receptor y puede ser el producto del pasado, presente o futuras actividades" [61] (Figura 12).

Un escenario con múltiples proyectos reconoce que muchos de los desafíos que tienen que ver con los efectos acumulativos son consecuencia de los límites organizativos y sus diferencias existentes entre los proponentes de los proyectos [61].

Si el punto de vista se fija sobre el área sensible, en lugar de fijarlo en el proyecto se llega a la situación de que no es posible conocer con los análisis ambientales realizados qué proyecto tiene mayor afección sobre ese punto ni, sobre todo, qué efectos ambientales sufrirá esa área sensible por el hecho de tener dos focos de afección. Uno de los retos que debe afrontar el análisis del riesgo ambiental, principalmente basado en Estudios de Impacto Ambiental es el efecto acumulativo de impactos [62] y la consecuente afección regional. La producción de pequeños impactos en el medio ambiente puede no tener importancia a corto plazo, pero sí ser más apreciables a largo plazo. Del mismo modo ocurre con pequeñas afecciones de proyectos diferentes sobre un mismo punto.

Figura 12: Marco conceptual de los impactos acumulativos en Minería [61]

A primera vista, la mayoría de los impactos medioambientales tienen un impacto predominantemente local, aunque algunos se relacionan con los efectos globales como el cambio climático. Cuando hay un punto de vista de los impactos globales acumulados, los objetivos no directamente relacionados con los problemas locales pueden ser aplicados por las autoridades gubernamentales. Las prácticas en la protección del hábitat y la eliminación de residuos, por ejemplo, que son aceptables en una situación local, por tanto, pueden necesitar ser cambiado cuando se toma en cuenta la dimensión global del impacto. Algunos productos químicos tóxicos como el cianuro y el mercurio (utilizado en el proceso de recuperación de oro a gran y pequeña escala, respectivamente) pueden causar la contaminación transfronteriza local, regional y en algunos casos dañar a la naturaleza ya las personas [15].

Se puede definir que el impacto ambiental regional es aquel que se produce en una escala espacial donde coexisten múltiples hábitats con múltiples fuentes de estrés afectando a múltiples y que pudieran ser de aplicación varios criterios de valoración [24].

Por ejemplo, si un proyecto genera una afección ambiental por polvo, que se da una valoración de X, sobre un punto determinado, y otro proyecto genera esa misma afección por polvo, con una valoración de Y, sobre el área sensible no es posible saber qué afección por polvo tendrá puesto que no se puede decir que sea X+Y, ya que los criterios de valoración no se tiene claro que sean los mismos, por lo que no pueden sumarse.

Figura 13: Afección de varios proyectos mineros sobre un mismo área sensible [60]

Existen diversos métodos desarrollados para la evaluación del riesgo regional, basados en estudios de los efectos ambientales a escala regional, siendo por tanto métodos válidos de aplicación para el cálculo del efecto bidimensional del impacto [24, 63-65].

El escenario extremo que puede darse es aquel en el que la falta de criterios de comparación de la afección ambiental de varios proyectos suceda en el caso de que los proyectos objeto de estudio pertenezca a países diferentes donde la legislación nacional aplicable es diferente. En este caso surgen problemas debidos a la heterogeneidad de la normativa aplicable [66, 67].

Figura 14: Afección de varios proyectos mineros sobre un mismo área sensible pertenecientes a diferentes países [60]

En este caso los análisis ambientales, como el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), están desarrollados bajo restricciones y condicionantes diferentes por lo que en ningún caso serán directamente comparables.

Por este motivo, se hace más necesario si cabe el desarrollo de unos criterios comparativos para poder determinar de manera inequívoca la afección ambiental en tal caso. En la actualidad, para solucionar este aspecto, se debe recurrir a acuerdos bilaterales (o multilaterales) entre los países implicados [68, 69].

3.7. Potenciales impactos ambientales en las operaciones mineras

A diferencia de otros proyectos, el desarrollo de los proyectos mineros tiene ciertas particularidades respecto a la afección al medio ambiente que se produce. Los impactos ambientales y sociales son diversos y, en ocasiones, duran mucho tiempo después del fin de las actividades mineras asociadas. Por lo tanto, los impactos de la minería tienen que ser cuidadosamente evaluados en una primera fase del proyecto minero, así como las acciones y los recursos necesarios para mitigar los posibles impactos después del final de la operación minera [7]. A diferencia de otras industrias, en Minería no es pertinente discutir ubicaciones alternativas de la mina porque los depósitos minerales están donde se propone el desarrollo del proyecto. Sin embargo, una compañía minera puede cambiar de un método de extracción de mina a cielo abierto a un método de extracción subterráneo a fin de preservar los recursos de la superficie. Por ejemplo, una mina subterránea puede desplazar menos habitantes y proteger mejor los recursos de la superficie, agua subterránea o el hábitat de vida silvestre ecológicamente importante [29].

Los potenciales impactos ambientales de una operación minera específica dependen de una amplia gama de factores locales, como la naturaleza del mineral y de la roca encajante, el contexto geológico y geotécnico, la existencia, la naturaleza y la probabilidad de los riesgos naturales, la naturaleza del método de extracción y, en su caso, el procesamiento y la fundición, requisitos de energía y agua del proceso de producción, la naturaleza y la cantidad de residuos gaseosos, líquidos y sólidos generados, la naturaleza y la vulnerabilidad de los componentes ambientales locales, sin olvidar las características geológicas, las políticas y la ética del desarrollo sostenible, tanto de la empresa minera como de las partes interesadas a nivel local, regional y nacional. A medida que el "período post-mina" forma parte integrante del ciclo de vida de la mina, la preparación y la gestión de esta fase juega un papel fundamental en la contribución de la minería al proceso de desarrollo sostenible [7].

El uso del terreno solo es temporal en muchos casos (de un par de años a varias décadas) y algunas antiguas canteras o graveras pueden ser dotadas incluso un mayor valor ecológico y/o recreativo de los terrenos en los que fueron originalmente desarrollados, convirtiéndose en biotopos de flora y fauna. Es frecuente el ejemplo que se encuentra en algunos países donde antiguas canteras o escombreras mineras han quedado englobadas en algunas de las zonas protegidas de mayor valor ecológico [7]. De este modo, existe la posibilidad que una vez finalizado el proyecto de extracción el valor ecológico, económico y social sea incluso superior

al inicial, ya que se produce una reordenación territorial que posibilita la utilización de los terrenos explotados.

3.7.1. Geomorfología y paisaje

Las necesidades de uso del terreno para la minería son limitadas, especialmente en comparación con otras actividades humanas con impactos ambientales significativos, como la agricultura y el transporte. La Geología y la explotación de recursos minerales suelen ser olvidados con frecuencia en las políticas de uso del suelo y la planificación, mientras que el acceso a la tierra es fundamental para el sector minero. Decisiones equivocadas en la ordenación del territorio afectan a la disponibilidad de los recursos minerales e incluso pueden crear impactos ambientales negativos debido a las rutas de transporte más largos, por ejemplo [7].

La explotación recursos minerales a través de actividades mineras de extracción alteran físicamente la superficie del suelo a través del desarrollo de frentes y bancos, y estos cambios en el paisaje son a menudo irreversibles. Esto es común a todas las actividades en las que es necesario mover tierra [70]. Otras operaciones relacionadas con la explotación de recursos minerales pueden tener un impacto sobre el paisaje, incluyendo el paisaje histórico: parques de almacenamiento de áridos; caballones de apantallamiento; balsas de decantación, planta de procesamiento, pistas y edificios. La mayoría de las explotaciones se encuentran en zonas rurales, donde su desarrollo introduce una intrusión visual similar al desarrollo industrial dentro de los usos del suelo predominantemente agrícola o forestal. Las propuestas de extracción de nuevos recursos o ampliaciones significativas a las operaciones existentes deben ser evaluadas cuidadosamente para determinar el impacto potencial sobre las características del paisaje del entorno. Esta evaluación permitirá una comprensión más completa del impacto visual de la propuesta de desarrollo de varios lugares para determinar la aceptabilidad de la elaboración, la eliminación y el diseño del desarrollo, y la estrategia de restauración más adecuada [71].

El paisaje minero y post-minero es una subcategoría de un paisaje cultural en el que los atributos culturales están en fuerte contraste con los naturales. En estas áreas la evolución gradual del paisaje se ha interrumpido, los ecosistemas originales han sido retirados, y la diversidad biológica se ha reducido significativamente. Además, el valor estético y paisajístico potencial recreativo se han degradado.

Por este motivo es clave una correcta gestión de la rehabilitación de áreas mineras. El objetivo de la restauración es crear un paisaje similar a su carácter anterior, pero a veces el objetivo es crear un paisaje con nuevos valores. La planificación del paisaje y la restauración en zonas en las que ha cesado ya la actividad minera no es sólo una opción inevitable para mantener las zonas mineras, sino también una vía importante para maximizar los recursos del paisaje y para

mejorar la función ecológica de las zonas que han sido explotadas con anterioridad [72]. En cualquier caso, se debe crear el mosaico de ecosistemas estables y sostenibles con diferentes usos de la tierra. Además, es importante la incorporación de este tipo de paisaje en un amplio marco de trabajo que incluye las relaciones socio-económicas de la zona de que se trate [73].

Hay muchos aspectos en los que el éxito de la restauración zonas mineras podrían ser evaluados [73]. Sin embargo, uno de los temas más difíciles de tratar, sigue siendo el impacto en el paisaje durante la operación y la mejora conseguida después de la rehabilitación de la mina [74]. Para analizar este aspecto existe una metodología desarrollada por Menegaki y Kaliampakos (2012)[74] que se describe a continuación y que está basada en el uso de Sistemas de Información Geográfica y centrada en dos aspectos fundamentales:

- La alteración del relieve topográfico.
- La sensibilidad de las condiciones de observación.

La complejidad del problema ha llevado a un importante esfuerzo a nivel mundial para el desarrollo de técnicas que podrían hacer frente a los diversos aspectos de la rehabilitación de las tierras minadas. Como resultado de este esfuerzo, hay prácticas recomendadas de gestión de suelos, control de erosión, estabilización de taludes, la selección de especies, la recolección de semillas, establecimiento de viveros y mantenimiento, estrategias de siembra y plantación, control de malezas, la fauna atracción y otros aspectos de las técnicas de rehabilitación, de los cuales se puede evaluar la efectividad e incluso medir en términos cuantitativos.

Sin embargo, la mayoría de las metodologías de evaluación de impacto visual existentes son semi-cuantitativas y concluyen en los objetivos de calidad visual o en clases de sensibilidad visual, sin ser capaz de evaluar la magnitud del impacto causado por la actividad minera o la mejora lograda por diferentes programas de rehabilitación.

En el caso de mejoras geomorfológicas, la herramienta principal hasta ahora ha sido la evaluación de la calidad visual del paisaje, que se mide por una variedad de métodos que evalúan el carácter del paisaje en base a las características del paisaje.

3.7.1.1. Medida de la alteración del relieve topográfico

Para la medición de la alteración relieve topográfico (TRA) se han establecido cinco índices: el índice de geomorfología (LI), el Índice de Altitud (IA), el Índice de geomorfología ajustado (ALI), que se produce como una combinación de la LI y AI, el índice de pendiente (SI) y el Índice de aspecto (ASI). Cada uno de estos índices determina la alteración promedio de la forma de relieve las características específicas debido a las actividades de minería a cielo abierto. Los datos necesarios para el cálculo de cada uno de los índices formados son resultado del análisis de Modelos Digitales del Terreno (MDT) creados para el contorno original y la superficie objeto de la investigación.

LI se calcula según la siguiente ecuación:

$$LI = \frac{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin}) - 2cov(Z_{orig}, Z_{fin})}{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin})} \quad (1)$$

Donde:

- Z_{orig} = altitudes de la topografía original
- $Var(Z_{orig})$ = varianza de la variable Z_{orig}
- Z_{fin} = altitudes de la topografía final (excavada o rehabilitada)
- $Var(Z_{fin})$ = varianza de la variable Z_{fin}
- $Cov(Z_{orig}, Z_{fin})$ = covarianza de las variables Z_{orig} y Z_{fin}

En el caso en que tenga lugar un desplazamiento vertical y uniforme del contorno original, las dos superficies varían juntas, dando lugar a $LI = 0$.

El Índice de Altitud (AI) se establece como un índice corrector a la LI y mide la variación vertical del relieve topográfico en el supuesto de que no se ha producido ningún otro cambio. La IA mide la desviación de los puntos de muestreo de las dos superficies (originales y de alivio de pseudo-final) de la altura media de la superficie original y se describe como sigue:

$$AI = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^v (Z_{pseudofin}^i - media Z_{orig})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^v (Z_{orig}^i - media Z_{orig})^2}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

- Z_{orig}^i = punto de elevación del terreno original a coordenadas X,Y.
- $Z_{pseudofin}^i$ = punto de elevación del terreno pseudo-final a coordenadas X,Y.
- $Media Z_{orig}$ = altitud media del terreno original.

El Índice de geomorfología ajustado (ALI) es una función lineal de la LI y AI, de la siguiente manera:

$$ALI = 0.8 \cdot LI + 0.2 \cdot AI \quad (3)$$

El Índice de pendiente (SI) calcula la diferencia media de la pendiente entre el original y la superficie final y se calcula, de la siguiente manera:

$$SI = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v \frac{|S_{orig}^i - S_{fin}^i|}{90^\circ} \quad (4)$$

Donde:

- S_{orig}^i = pendiente de la superficie original en la muestra i.

- $S_{fin}i$ = pendiente de la superficie final en la muestra i.

El Índice de aspecto (ASI) mide el cambio de aspecto promedio entre la topografía original y la final y se estima, de la siguiente manera:

$$I = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v \frac{|ASI_{orig}i - ASI_{fin}i|}{180^\circ} \quad (5)$$

Donde:

- $ASI_{orig}i$ = aspecto de la superficie original, en la muestra i.
- $ASI_{fin}i$ = aspecto de la superficie final, en la muestra i.

Con este procedimiento se propone una metodología para evaluar cuantitativamente el impacto de las actividades mineras sobre la geomorfología y el paisaje que da lugar a una herramienta aplicable a la metodología para evaluar el conjunto de los impactos ambientales establecida en el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

3.7.2. Subsistencia

Se puede definir la subsidencia en minería como el efecto que se produce cuando se extraen minerales por métodos de minería subterránea y por esta razón los niveles de roca y el terreno suprayacentes ceden hacia las cavidades subterráneas creadas, con lo que se produce un hundimiento de la superficie del terreno superficial que da lugar a la formación de huecos, zanjas e incluso extensos valles [75, 76].

La subsidencia implica el asentamiento del terreno de superficie en una extensa área debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas. Aunque se trata de un fenómeno que no suele ocasionar víctimas mortales, los daños económicos y sociales que causa pueden llegar a ser cuantiosos. El control de estas subsidencias es crucial en zonas urbanas donde los daños y perjuicios ocasionados pueden ser muy importantes, suponiendo un riesgo elevado para edificaciones, canales, conducciones, vías de comunicación, así como todo tipo de construcciones asentadas sobre el terreno que se deforma. Aunque en las zonas rurales y agrícolas los problemas derivados de la subsidencia son significativamente menores, la presencia de este tipo de fenómenos puede significar la existencia de actividades en la zona que afecten a las características y la estabilidad del suelo, lo cual es necesario controlar [77].

El estudio de este fenómeno hace necesario su seguimiento con el fin de determinar la extensión de la zona afectada, las velocidades de asiento, los mecanismos que rigen el fenómeno y los instantes críticos de aceleración del proceso de consolidación del terreno. La mayor parte de las veces el problema se ausulta desde la superficie, midiendo las

deformaciones que la afectan mediante técnicas de topografía clásica, como la nivelación geométrica [77].

Para minimizar y/o controlar los cambios en la superficie originados por la subsidencia del terreno, las medidas de gestión recomendadas puede ser [78]:

- Llevar a cabo el proyecto de mina teniendo en cuenta la ubicación y tamaño del yacimiento, estratos superiores y profundidad requerida para los pozos de extracción (por ejemplo, el potencial de generación de subsidencia es menor cuanto mayor es la profundidad de la extracción)
- Monitorizar el tamaño y forma de las excavaciones generadas.
- Rellenar las excavaciones generadas (pozos, galerías, cámaras, cavernas) una vez explotadas con materiales para prevenir o reducir la subsidencia en áreas de alto riesgo.
- Las áreas de subsidencia deben ser gestionadas de tal manera que se asegure un adecuado drenaje y un restablecimiento de los usos previos a la explotación, o bien otros usos aceptables por la comunidad.

La extensión y la cantidad de hundimientos debidos a las actividades de minería subterránea dependen de una serie de factores, como la profundidad de la excavación, la potencia de la capa, las propiedades de los estratos superiores, los métodos de producción, las dimensiones del panel, los defectos geológicos, superficie topográfica, etc. [79].

Existen diversos métodos de modelización que se utilizan para la predicción de la subsidencia, que pueden ser métodos gráficos, numéricos, empíricos, etc. [79, 80], aunque la mayoría de ellos están desarrollados en unas condiciones geológico-geotécnicas determinadas y son difícilmente extrapolables a otras áreas o para otros casos.

Desde un punto de vista cualitativo, puede establecerse una clasificación de métodos de explotación en función de los efectos creados por la subsidencia del terreno a tener en cuenta en la selección del mismo [81].

Tabla 5: Consideraciones sobre la subsidencia de varios métodos de explotación [81]

Método	Consideraciones sobre la subsidencia
Cámaras y Pilares	Posibilidad de subsidencia
Cámaras por subniveles	Relleno para evitar la subsidencia
Hundimiento	Relleno para evitar la subsidencia
Corte y Relleno	Relleno para evitar la subsidencia
Tajo Largo	Posibilidad de subsidencia
Hundimiento por subniveles	Severos efectos por subsidencia
Hundimiento por bloques	Severos efectos por subsidencia

3.7.3. Afección a los cursos del agua

La gestión del uso y la calidad del agua en proyectos mineros puede ser un tema importante a tratar. La contaminación potencial de los cursos del agua puede producirse ya desde las etapas más tempranas del ciclo de la mina, durante la fase de exploración y puede dar lugar a otros impactos indirectos (por ejemplo, migración de la población) que pueden resultar perjudiciales a la calidad del agua. La reducción de la disponibilidad de aguas tanto superficiales como subterráneas, también tiene influencia a nivel local para las comunidades vecinas de las explotaciones mineras, sobre todo en zonas áridas o en regiones de alto potencial agrícola. Las actividades mineras deben estar dotadas de una gestión y monitorización adecuadas del uso del agua, además de sistemas de tratamiento de efluentes, incluyendo el agua de escorrentía que presente la explotación [78], ya que son múltiples los caminos a través de los cuáles se puede producir la afección y contaminación tanto de las aguas superficiales como subterráneas (Figura 15).

Figura 15: Impactos de las labores mineras y sus residuos en las aguas subterráneas y superficiales [82]

En relación al uso del agua, puede decirse que las minas pueden usar grandes cantidades de agua fresca, siendo la mayor parte destinada a las plantas de tratamiento y otras actividades asociadas. También tienen un consumo importante los sistemas de supresión de polvo. Si se analizan los circuitos de recuperación de agua, se comprueba que puede producirse una pérdida de agua por evaporación en el producto final, pero que las mayores pérdidas de agua se producen sobre todo en las balsas de residuos. Todas las minas deben realizar una gestión adecuada del agua y del balance hídrico. Aquellas minas con exceso de agua, como puede ser el caso de explotaciones en entornos tropicales o áreas con nieve o hielo fundido, pueden experimentar picos o puntas de flujo de aguas, que requieren una gestión adecuada.

Las prácticas recomendadas para una correcta gestión del agua incluyen [78]:

- Establecer un balance hídrico (incluyendo posibles eventos climáticos de naturaleza extraordinaria) para la explotación minera y los procesos asociados a la misma, e incorporarlo al diseño general de la infraestructura de mina.
- Desarrollar un plan de abastecimiento sostenible de agua para minimizar el impacto en el medio natural, gestionando en uso del agua, evitando el agotamiento de acuíferos y minimizando el impacto a otros usuarios del agua.
- Minimizar la cantidad de agua de proceso.
- Considerar la reutilización, reciclaje y tratamiento del agua de proceso allí donde sea viable.
- Considerar el potencial impacto en el balance hídrico antes de cualquier actividad de desagüe.

- Consultar con cualquiera de las partes implicadas (gobierno, sociedad y potenciales comunidades afectadas) para conocer cualquier conflicto entre el uso de agua en la explotación y la demanda de agua, así como la dependencia de las comunidades de los recursos hídricos y/o cualquier necesidad de conservación que pudiera existir en la zona.

El término calidad del agua se refiere a las condiciones físicas y químicas tanto de las aguas superficiales como subterráneas. Las condiciones físicas incluyen la temperatura y presencia de partículas sólidas; las condiciones químicas dependen de los tipos y la concentración de elementos químicos en su composición.

El medio acuático nunca es puro; las aguas naturales siempre contienen una cierta cantidad de elementos químicos disueltos (solutos) que han sido originados de la atmósfera, de los suelos o de la meteorización del lecho rocoso. La química del agua depende en gran medida del clima de influencia, y especialmente de la geología y existe una amplia gama de carga de solutos (alcance y concentración de solutos, incluyendo los nutrientes).

Las prácticas recomendadas para gestionar los impactos en la calidad del agua incluyen [78]:

- La calidad y cantidad de flujos de efluentes descargados en el medio ambiente, incluidos las aguas pluviales, drenaje de lixiviación, efluentes de proceso y sistemas de drenaje generales de mina deberían ser gestionados y tratados para cumplir con la normativa vigente y los códigos de buenas prácticas aplicables.
- Además, las descargar a las aguas superficiales no deberían exceder los límites de contaminantes establecidos para dicho proceso.
- Se deberían instalar sumideros o trampas que retengan grasas y aceites en las estaciones de suministro de combustible, talleres, depósitos de combustible y zonas de contenedores, y debiera haber disponibles sistemas de recogida de vertidos con su correspondiente plan de emergencia.
- La calidad del agua en sistemas descubiertos (zonas de lixiviación, estanques de soluciones y balsas de residuos) deberían estar situados en aquellos lugares donde se haya realizado una evaluación de riesgos específica con la implementación de las medidas de control adecuadas para reducir el riesgo en caso de vertido.
- Las aguas residuales sanitarias debería ser gestionadas en base a la reutilización, vertido a fosa séptica o bien tratadas en una línea específica.

3.7.4. Calidad del aire. Emisiones y generación de polvo.

El principal problema de la calidad del aire es la generación de polvo producido por los trabajos de las operaciones a cielo abierto y las operaciones de trituración y molienda. El polvo también puede ser generado desde las presas de residuos. Los trabajadores y las comunidades cercanas pueden verse afectadas por el polvo en la atmósfera. Además, la sedimentación de las

partículas alrededor de las explotaciones mineras puede contaminar los suelos y el agua y dañar la vegetación. Las minas también son fuentes de generación de gases de efecto invernadero. El CO₂ es producido por el uso de la energía y a veces, el metano es liberado en las excavaciones subterráneas, especialmente en las explotaciones de carbón [83].

El polvo generado en minería puede deberse a emisiones de las propias tareas de excavación, de las pistas de transporte y de la perforación de barrenos de voladura o bien a emisiones desde la planta de tratamiento, en las etapas de trituración y clasificación [84]. Es importante contemplar también las emisiones desde las instalaciones de residuos mineros (escombreras y balsas que, en muchos casos son superiores a las de las instalaciones de producción.

Existen estudios, como los desarrollados por Chakraborty (2002) [85], que establecen que la calidad del aire en minería se determina mediante el estudio de diversos parámetros, en función de los focos de generación de emisiones que se pueden destacar los siguientes:

- Trabajos de perforación.
- Carga de estéril.
- Carga de carbón (o mineral).
- Pistas de transporte.
- Descarga de carbón (o mineral).
- Vertederos de estéril expuestos.
- Parques de almacenamiento de mineral.
- Planta de tratamiento de carbón.
- Talleres.
- Superficie de mina expuesta.

Se han desarrollado modelos que sirven para estimar cada uno de los parámetros establecidos anteriormente que se detallan en la Tabla 7.

Cabe destacar que las tasas de emisión dependen del contenido de humedad, contenido de limo, velocidad del viento, diámetro de perforación, producción de la perforación, altura de tamaño de la cargadora, velocidad media de los vehículos, capacidad de los volquetes, frecuencia de carga y descarga, producción de mineral/carbón y producción de estéril.

El control de las emisiones en mina por lo general depende de la utilización de camiones de agua, máquinas barredoras, y aplicaciones químicas en las pistas de transporte, el control de la velocidad de los vehículos, y la construcción de barreras rompevientos y colocación de plantaciones vegetales. Los impactos por polvo producidos en la planta pueden ser mitigados por cualquiera de los sistemas de supresión por vía húmeda, que consisten en la aplicación de pulverización y nebulización de agua (o agua tratada con surfactante), en aquellos puntos y sitios que generan polvo en toda la planta, o sistemas de control en seco, que incluyen la colocación de cubiertas en cintas transportadoras, sistemas de vacío y captadores de polvo que eliminan el polvo antes de que la corriente de aire se libere a la atmósfera. Los

trabajadores están protegidos contra el polvo mediante el uso en maquinaria de cabinas cerradas con aire acondicionado y, cuando sea necesario, el uso de respiradores [84].

Las comunidades cercanas a canteras de áridos naturales, sin embargo, están preocupados porque las actividades necesarias para llevar a cabo su actividad, como la perforación, voladuras, trituración y transporte por carretera, pueden producir riesgos en el aire invisibles e indetectables, como las partículas de sílice cristalina de grano muy fino en suspensión, que podrían afectar a la salud de los residentes sin protección. Sin embargo no se ha llevada a cabo ningún estudio para poner a prueba esta hipótesis [84].

En relación a la emisión de gases de efecto invernadero se han desarrollado análisis que permiten estimar el ratio de emisión en función de la producción anual de mineral, para diversos productos [86]. Los datos que pueden servir de referencia se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Consumo de energía global y generación de gases de efecto invernadero [86]

Tipo de mena/Operación	Energía (MJ/t mena o concentrado)		Calentamiento global (kgCO ₂ / t mena o concentrado)	
Mena de hierro		(%)		(%)
Perforación	1,3	(0,9)	0,1	(0,8)
Voladura	3,3	(2,2)	0,7	(5,9)
Carga y Transporte	92,1	(60,3)	6,0	(50,5)
Trituración y cribado	23,1	(15,1)	2,5	(21,0)
Almacenamiento	4,6	(3,0)	0,5	(4,2)
Transporte por ferrocarril	20,9	(13,7)	1,3	(10,9)
Operaciones portuarias	7,4	(4,8)	0,8	(6,7)
TOTAL	152,7		11,9	
Bauxita		(%)		(%)
Perforación	1,2	(2,2)	0,1	(2,0)
Voladura	2,0	(3,6)	0,4	(8,2)
Carga y Transporte	13,1	(65,8)	2,6	(53,1)
Trituración y cribado	14,7	(26,8)	1,7	(34,7)
Beneficio	0,9	(1,6)	0,1	(2,0)
TOTAL	54,9		4,9	
Concentrado de cobre		(%)		(%)
Perforación	720	(8,6)	30,8	(4,9)
Voladura	43	(0,5)	9,1	(1,4)
Carga y Transporte	2059	(24,7)	88,1	(14,0)
Ventilación	1417	(17,0)	127,0	(20,2)
Desagüe	673	(8,1)	60,3	(9,6)
Trituración y molienda	3277	(39,4)	293,7	(46,8)
Concentración	140	(1,7)	19,2	(3,1)
TOTAL	8329		628,2	

En el caso de generación de efecto invernadero para el caso de explotaciones de áridos, se pueden tener en cuenta las investigaciones desarrolladas por Bascetin et al. en 2011 [87], cuyos resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 7: Fórmulas empíricas de ratios de emisión en función de la actividad [85]

Actividad	Ecuación empírica
Perforación	$E = 0,0325 \left[\frac{100 - m}{\frac{s \cdot u}{100 - s}} \right]^{0,1} (df)^{0,3}$
Carga de estéril	$E = \left[0,018 \left(\frac{100 - m}{m} \right) \right]^{0,1} \left(\frac{s}{100 - s} \right)^{0,4} (uhxl)^{0,1}$
Carga de mineral/carbón	$E = \left(\frac{100 - m}{m} \right)^{0,1} \left(\frac{s}{100 - s} \right)^{0,3} h^{0,2} \cdot \frac{u}{(0,2 + 10,5u)} \cdot \frac{xl}{(15,4 + 0,87 \cdot xl)}$
Pistas de transporte	$E = \left(\frac{100 - m}{m} \right)^{0,8} \left(\frac{s}{100 - s} \right)^{0,1} u^{0,3} (2663 + 0,1 \cdot (v + fc) \cdot 10^{-6})$
Caminos de acceso	$E = \left(\frac{100 - m}{m(100 - s)} \right)^{0,1} u^{1,6} [1,64 + 0,01(v + f)] \cdot 10^{-3}$
Descarga de estéril	$E = 1,76 \cdot h^{0,5} \left(\frac{100 - m}{m} \right)^{0,2} \left(\frac{s}{100 - s} \right)^2 u^{0,8} (c \cdot y)^{0,1}$
Descarga de mineral/carbón	$E = 0,023 \cdot \left(\frac{(100 - m)sh}{m(100 - s)} \right)^2 (u^3 cy)^{0,1}$
Vertederos expuestos de estéril	$E = \left(\frac{100 - m}{m} \right)^{0,2} \left(\frac{s}{100 - s} \right)^{0,1} \left(\frac{u}{2,6 + 120 \cdot u} \right) \left(\frac{a}{0,2 + 276,5 \cdot a} \right)$
Parques de mineral	$E = \left(\frac{100 - m}{m} \right)^{0,1} \left(\frac{s}{100 - s} \right) \left(\frac{u}{71 + 43u} \right) \left[\left(\frac{cy}{329 + 7,6cy} \right) + \left(\frac{lx}{30 + 900lx} \right) \right]$
Planta de tratamiento de carbón	$E = \left(\frac{100 - m}{m} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{a^2 \cdot s}{100 - s} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{u}{160 + 3,7 \cdot u} \right)$
Talleres	$E = \left(0,064 \frac{100 - m}{m} \right)^{1,8} \left(\frac{a \cdot s}{100 - s} \right)^{0,1} \left(\frac{u}{0,01 + 5 \cdot u} \right) \cdot 10^{-4}$
Superficie de mina expuesta	$E = \left(2,4 \frac{100 - m}{m} \right)^{0,8} \left(\frac{a \cdot s}{100 - s} \right)^{0,1} \left(\frac{u}{4 + 66 \cdot u} \right) \cdot 10^{-4}$
Emisión global de partículas	$E = u^{0,4} \cdot a^{0,2} \frac{9,7 + 0,01p + b}{4 + 0,3b}$
Emisión global de SO ₂	$E = a^{0,14} \frac{u}{1,83 + 0,93u} \left(\frac{p}{0,48 + 0,57p} + \frac{b}{14,37 + 1,15b} \right)$
Emisión global de NO _x	$E = a^{0,25} \left(\frac{u}{4,3 + 32,5u} \right) \left(1,5^p + \frac{b}{0,06 + 0,08b} \right)$

Los parámetros y unidades usadas son: contenido de humedad (%), m; contenido de limo (%), s; velocidad del viento (m/s), u; diámetro de perforación (mm), d; frecuencia (nº barrenos/día), f; altura de caída (m), h; tamaño de la cargadora (m³), l; velocidad media de los vehículos (m/s), v; capacidad de los volquetes (t), c; área (km²), a; frecuencia de descarga (nº/h), y; frecuencia de carga (nº/h), x; producción de mineral/carbón (Mt/año), p; manipulación de estéril (Mm³/año), b; ratio de emisión (g/s), E.

Tabla 8: Generación de gases de efecto invernadero en canteras [87]

Operación	kg CO ₂ /t
Voladura	0,0089
Carga y Transporte (diésel)	1,438
Trituración y clasificación	0,95
Drenaje	0,042
Consumos generales	0,035

3.7.5. Consumo de energía

Un aspecto fundamental en el estudio de los impactos ambientales a nivel global es el consumo de energía. Este aspecto resulta clave para una correcta gestión ambiental y está directamente relacionado con la generación de gases de efecto invernadero así como la huella de CO₂ del proceso (ver apartado 3.7.4).

Se puede decir que los metales son una clase de materiales tecnológicamente muy valiosos, que pueden requerir cantidades significativas de energía para producirse. El uso de energía se produce en todo el ciclo de vida de los metales y es, por lo general, mucho más alto para la producción primaria que para la producción secundaria (reciclado) de los mismos. La producción de metales de sus minerales asociados implica varias etapas, incluyendo la extracción minera, el procesamiento de minerales / concentración, extracción y refinación de metales. En cada etapa, las impurezas se separan y se retiran y la concentración de metal en los productos finales aumenta [35].

Las características mineralógicas, su paragénesis y las características de la roca encajante en la que se encuentra la mena metálica, determinan las necesidades de energía relacionadas con el grado de liberación del mineral que dan lugar a la necesidad de un alto consumo de energía para la producción de metal. Los parámetros físicos tales como la ley del mineral y la profundidad de un depósito de metal dictan la cantidad de mineral que debe ser extraído y qué distancia se debe recorrer para producir una unidad de metal, los cuales tienen implicaciones significativas de consumo de energía. Químicamente, casi todos los metales que se encuentran en la naturaleza se unen en minerales químicamente estables. Esto significa que hay una cantidad mínima de energía necesaria para producir cada metal, y que ninguna cantidad de la innovación o el progreso tecnológico permitirán a los seres humanos pasar este límite termodinámico [35].

En relación al consumo de combustible diesel, se muestra en la Tabla 9 una recopilación de datos de consumo medio de combustible en grandes minas en todo el mundo.

Tabla 9: Consumo medio de diesel en grandes minas a cielo abierto de todo el mundo [88]

	Años de datos	Mt roca/año			Litro diésel/tonelada roca		
		Media	Mínimo	Máximo	Media	Mínimo	Máximo
Minas de oro	62	56,7	13,0	199	0,68	0,33	1,18
Minas de cobre	3	394	321,1	432	0,88	0,81	1,00
Minas de cobre-oro	15	202	40,0	360	0,64	0,38	1,18
Media general	80	96,6	13,0	432	0,68	0,33	1,18

Los estudios desarrollados por Norgate entre 2010 y 2013 [35, 86, 89, 90], establecen una serie de valores de referencia para el consumo de energía de los procesos de extracción de diversos metales.

Se muestra la energía necesaria para la producción de metales primarios en la Figura 16.

Figura 16: Energía necesaria (GER) para la producción de metales primarios [89]

Tabla 10: Consumo de energía en función del tipo de energía y la operación [86]

Tipo de mena/Método minero/Operación	Tipo de Energía	Valor	Unidad
Mena de hierro (Cielo abierto)			
• Perforación	Diesel	0,03	kg/t mineral
• Voladura	Explosivos	0,5	kg/t mineral
• Carga y Transporte	Diesel	2,2	kg/t mineral
• Trituración y cribado	Electricidad	2,5	kWh/t mineral
• Almacenamiento	Electricidad	0,5	kWh/t mineral
• Transporte por ferrocarril	Diesel	0,5	kg/t mineral
• Operaciones portuarias	Electricidad	0,8	kWh/t mineral
GENERAL	Agua	0,21	m ³ / t mineral
	Diesel	3,4	kg/t mineral
		135	MJ/t mineral
	Electricidad	3,8	kWh/t mineral
	Explosivos	0,5	kg/t mineral
	Roca estéril	1,3	t/t mineral
Bauxita (Cielo abierto)			
• Perforación	Diesel	0,03	kg/t mineral
• Voladura	Explosivos	0,3	kg/t mineral
• Carga y Transporte	Diesel	0,9	kg/t mineral
	Electricidad	0,1	kWh/t mineral
• Trituración y cribado	Electricidad	1,7	kWh/t mineral
• Beneficio	Electricidad	0,1	kWh/t mineral
GENERAL	Agua	0,3	m ³ / t mineral
	Diesel	0,93	kg/t mineral
		38	MJ/t mineral
	Electricidad	2,0	kWh/t mineral
	Explosivos	0,3	kg/t mineral
	Roca estéril	0,3	t/t mineral
Concentrado de cobre (Minería subterránea)			
• Perforación	Diesel	0,7	kg/t mineral
• Voladura	Diesel	0,1	kg/t mineral
	Explosivos	0,4	kg/t mineral
• Carga y Transporte	Diesel	2,0	kg/t mineral
• Ventilación	Electricidad	8	kWh/t mineral
• Desagüe	Electricidad	3,8	kWh/t mineral
• Trituración y molienda	Electricidad	18,5	kWh/t mineral
• Concentración	Mena de cobre	16,2	t mena/ t concentrado
	Electricidad	7,5	kWh/t mineral
	Reactivos	1,7	kg/t mineral
	Medio de Molienda	1,4	kg/t mineral
	Residuos	37	t/ t concentrado
	Mena de cobre	16,2	t mena/ t concentrado
GENERAL	Agua	0,51	m ³ / t mineral
	Diesel	2,8	kg/t mineral
		115	MJ/t mineral
	Electricidad	46,4	kWh/t mineral
	Explosivos	0,4	kg/t mineral
	Reactivos	1,7	kg/t mineral
	Medio de Molienda	1,4	kg/t mineral
	Roca estéril	0,03	t/t mineral
	Residuos	2,3	t/ t concentrado

3.7.6. Ruido

El ruido se define como cualquier sonido o sonidos fuertes, discordantes o desagradables. Más comúnmente, en un contexto ambiental, el ruido se define simplemente como un sonido no deseado [42, 91]. Ciertas actividades producen niveles de sonido o sonidos característicos de manera inherente, que tienen la capacidad potencial de crear ruido. El sonido generado por las instalaciones existentes o proyectadas puede convertirse en ruido debido al uso del terreno que rodea la instalación. Cuando los terrenos colindantes a una instalación existente o proyectada tienen usos residenciales, comerciales, institucionales o recreativos próximos a la instalación, el ruido es probable que sea un motivo de preocupación para los residentes o usuarios de los terrenos adyacentes.

Son numerosos los factores ambientales que determinan el nivel o la perceptibilidad del sonido en un punto de recepción determinado. Estos factores incluyen: la distancia desde la fuente de sonido al receptor, terreno circundante, nivel sonoro ambiental, hora del día; dirección del viento, gradiente de temperatura y humedad relativa, entre otros. Las características de un sonido son también factores determinantes importantes para considerar como ruido a un sonido. Tanto la amplitud (intensidad), la frecuencia (tono), como los patrones de impulso y la duración del sonido afectan el potencial de un sonido a ser un ruido. La combinación de características de sonido, los factores ambientales y la sensibilidad física y mental de un receptor a un sonido de determinar si un sonido se percibe como un ruido [91].

En cuanto a los factores meteorológicos, existen estudios que determinan que no tienen mucha influencia en el ruido generado por la maquinaria hasta una distancia de 30,5 metros (100 pies) de la fuente de emisión [92]. Según este dato, para el estudio de las afecciones ambientales ocasionadas por la generación de ruido, los factores meteorológicos influirán en la propagación del ruido en el exterior de la explotación, ya que puede decirse que siempre, los límites de la explotación estarán a más de 30 metros de la fuente de generación.

Las fuentes de emisiones de ruido asociadas con la actividad minera pueden incluir a los motores de los vehículos, las operaciones de carga y descarga de rocas, voladuras, generación de energía y otras fuentes relacionadas con la construcción y las actividades de la mina.

De este modo, uno de los puntos de emisión clave para la evaluación de las afecciones por ruido es el ruido generado por la maquinaria [93]. Algunos valores de referencia para el sonido generado por distintas familias de maquinaria empleada en minería se muestran en la Figura 17, expresados en valores de presión acústica A-Ponderada equivalente, en dB(A) [94].

Figura 17: Niveles de sonido típicos asociados con maquinaria de minería de superficie [94]

Para valores más concretos, en función de la potencia de maquinaria se puede recurrir a consultar la norma Británica “BS 5228-1:2009. Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites – Part 1: Noise” [93], donde figura esta información más detallada, sobre datos de nivel de sonido generado por maquinaria.

A este respecto, se hace referencia a valores de presión acústica ponderado-A equivalente (L_{Aeq}). El nivel de presión acústica ponderado-A es una medida de la capacidad del ruido de dañar permanentemente el oído humano. La razón de introducir un factor de ponderación en

las determinaciones del nivel de presión acústica estriba en que el oído humano no tiene la misma respuesta a todas las frecuencias audibles. Este factor de ponderación se incorpora al instrumento de medida mediante un circuito electrónico capaz de modificar la señal captada por el micrófono de forma similar a como lo hace el oído humano. Los resultados de las mediciones de nivel de presión acústica obtenidas utilizando esta ponderación deben identificarse como dB(A) [95]. L_{Aeq} es el valor del nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A determinado a una distancia de 10 m, en un periodo de tiempo determinado y para una cierta actividad [93].

Una vez identificadas las fuentes generadoras de impacto, se deberá establecer los valores que se perciben en aquellos puntos sensibles objeto de estudio. Para ello, se debe conocer los modelos de atenuación en la propagación del sonido en el exterior.

Los modelos de predicción del nivel de ruido son útiles tanto si existen limitaciones de ruido como si no. Antes de comenzar el trabajo de predicción de la generación de ruido se deberá tener en cuenta:

- Las autoridades locales deben conocer los niveles de ruido esperados en un emplazamiento con el fin de que las evaluaciones se puedan hacer en cuanto a si existen problemas potenciales y si los controles son necesarios. También deben asegurarse de que cualquier límite de ruido establecido en los modelos son realmente aplicables y que los límites son capaces de proteger a la comunidad del ruido excesivo.
- Los técnicos involucrados en el desarrollo del proyecto necesitan saber si sus operaciones en el emplazamiento concreto causará problemas de ruido y, en caso afirmativo, si las operaciones serán capaces de cumplir con los límites de ruido especificados.
- Los contratistas necesitan conocer los niveles de ruido esperados para seleccionar la planta más apropiada de acuerdo con los límites especificados. Ellos también necesitan saber en la fase de licitación que son necesarios controles de ruido para que puedan hacer las asignaciones de costes correspondientes.

El ruido del emplazamiento puede ser evaluado en términos del nivel de sonido equivalente continuo y / o en términos del nivel máximo. El nivel de sonido en el barrio que surge de un sitio dependerá de un número de factores. Los procedimientos de estimación tienen que tener en cuenta los factores más importantes, a saber:

- Las salidas de potencia acústica de los procesos y de las plantas;
- Los períodos de funcionamiento de los procesos y de las plantas;
- Las distancias entre las fuentes al receptor;
- La presencia de la detección por las barreras;
- La reflexión del sonido ;
- La atenuación suelo.

Otros factores, como las condiciones meteorológicas (especialmente la velocidad y dirección del viento) y la absorción atmosférica también pueden influir en el nivel de ruido recibido. La estimación de los efectos de estos factores es complicado, sobre todo debido a la interacción entre estos factores. En general, en las distancias cortas (es decir, menos de 50 m), el tamaño de cualquier efecto derivados de estos factores será pequeño, mientras que a distancias más largas habrá una tendencia hacia un aumento en la atenuación de sonido. Las condiciones meteorológicas pueden dar lugar a un aumento de los niveles de ruido debido a la direccionalidad del sonido. Los procedimientos de estimación descritos son aplicables también al sonido que viaja a través de las áreas de agua (ríos, puertos, lagos, etc.) [93]

La secuencia de trabajo para la realizar la predicción del nivel de ruido particularizado para obras de construcción y explotaciones mineras donde las fuentes de generación más importantes se basan en la existencia de plantas y equipos móviles se muestra en la Figura 18.

Este método está basado en el empleo del nivel de presión acústica ponderado-A equivalente (L_{Aeq}), descrito anteriormente.

El método de medida de la actividad L_{Aeq} se puede utilizar para las actividades fijas y cuasi-estacionarias y es el mejor método a utilizar cuando estas actividades y sus lugares están claramente definidos. Esta medida de la actividad L_{Aeq} debe ser corregida para la distancia fuente - receptor, las reflexiones de onda y el apantallamiento o la atenuación del terreno.

Las ventajas de este método son que las variaciones en los tiempos de ciclo de la planta, las interacciones entre los diversos elementos de la planta durante la actividad y la variación global consecuente de nivel de ruido con el tiempo se toman en cuenta automáticamente. Para una planta en operación continua es necesario determinar la proporción del periodo de evaluación durante el cual la planta está operando y para ajustar el L_{Aeq} durante periodos de no funcionamiento.

Para las instalaciones cíclicas o intermitentes, tiene que ser estimado el número de secuencias completas que se producirán dentro de la jornada de trabajo y ajustar el L_{Aeq} , si fuera necesario [93].

Figura 18: Diagrama de trabajo para la estimación del nivel de ruido en explotaciones mineras [93]

Del mismo modo, se deberán tener en cuenta las características del terreno para establecer la atenuación que efectúa dicho terreno. Se considera “terreno duro” a aquellas superficies de tierra que reflejan el sonido, por ejemplo, áreas pavimentadas, laminados de asfalto y la superficie del agua. Se considera “terreno blando” para referirse a superficies que son absorbentes de sonido, por ejemplo, pastizales, campos o plantaciones cultivadas. Cuando el terreno entre la fuente y el receptor es una combinación de duro y blando, se deberá considerar como mixta.

Método de predicción del sonido debido a una fuente fija.

El procedimiento de predicción de la atenuación del sonido, seguirá la estructura siguiente:

1. Obtener el nivel de presión equivalente L_{Aeq} mediante la medición directa de plantas o lugares semejantes en el modo de operación, o utilizar los valores indicados en la bibliografía [93].
2. Si la distancia, medida en metros, es distinta de diferente a 10 metros del punto de interés (Valor usado de referencia para la medición de L_{Aeq}), reducir el valor L_{Aeq}

considerado inicialmente, el valor de la atenuación debida al terreno, en base a la Figura 19.

Figura 19: Ajuste debido a la absorción del sonido en el terreno [93]

3. Establecer los ajustes por reflexiones y apantallamientos.

La determinación del efecto de absorción del sonido por efectos de apantallamiento es un proceso complejo, ya que depende de la frecuencia de la fuente de emisión de sonido y de la posición relativa respecto a las barreras (naturales o artificiales) existentes.

Si no se dispone de datos espectrales de la fuente de emisión para una primera aproximación, si hay una barrera, o cualquier otro accidente topográfico entre la fuente y el receptor, se puede asumir que existe una atenuación de 5 dB cuando la parte alta de la planta sea visible desde el punto de vista del receptor, y será de 10 dB cuando la barrera acústica oculte por completo la fuente del receptor. Se debe restar la atenuación considerada del valor de L_{Aeq} del emisor en el punto de interés. En aquellos lugares que estén a 1 m de una fachada de un edificio, se deberá corregir por el efecto de reflexión del sonido, añadiendo el valor de 3 dB a los niveles calculados.

4. Repetir los puntos anteriores para cada una de las fuentes.
5. Estimar el porcentaje del periodo de evaluación en el que la actividad tiene lugar.

Figura 20: Efecto de apantallamiento debido a una barrera [93]

Método de predicción de impacto para una fuente móvil, usando un camino prefijado de forma regular.

Para el caso de una estimación de la generación de ruido de una manera regular debido a pistas de transporte, se puede usar el efecto del ruido por hora. Para vehículos que pasan a intervalos más o menos fijos, se puede usar la determinación del nivel de sonido equivalente usando el método siguiente:

1. La expresión general para la predicción del L_{Aeq} a lo largo de una carretera de transporte hasta una planta fija, para un único equipo de transporte es la siguiente:

$$L_{Aeq} = L_{WA} - 33 + 10\log_{10}Q - 10\log_{10}V - 10\log_{10}d \quad (6)$$

Donde:

- L_{WA} es el nivel de presión sonora de la planta, en decibelios (dB)
 - Q es el número de vehículos por hora.
 - V es la velocidad media del vehículo, en kilómetros por hora (km/h).
 - d es la distancia a la posición del receptor, desde el centro del camino de transporte, en metros (m).
2. Si es necesario, ajustar el nivel de sonido equivalente debido a reflexiones y apantallamientos.
 3. Donde el ángulo de visión, a_v en grados, sea menor de 180 grados, aplicar la corrección por ángulo A, donde

$$A = 10\log_{10}\left(\frac{a_v}{180}\right) \quad (7)$$

4. Repetir las etapas anteriores para todas las fuentes de sonido.
5. Estimar el porcentaje debido al periodo de evaluación donde cada actividad tiene lugar.

Predicción del sonido generado por varias fuentes:

La fórmula generalizada para la combinación de dos niveles de sonido dB_1 y dB_2 , es:

$$dB_{Total} = 10\log_{10}\left(e^{\frac{dB_1}{10}} + e^{\frac{dB_2}{10}}\right) \quad (8)$$

3.7.7. Efectos de las operaciones de voladura: Vibraciones, Ruido y Onda aérea.

Las voladuras son una de las operaciones clave en las actividades de producción mineras, ya que el método de perforación y voladura es de uso común en distintos materiales, en diferentes diseños de mina y se utiliza tanto en la minería a cielo abierto como en minería de interior.

El uso de los explosivos como técnica de arranque en minería se hace de distintas formas en función del uso final de la roca fragmentada. Así, el diseño de una voladura tiene que ser llevado a cabo en función del objetivo buscado. En cualquier caso, las operaciones de detonación generarán efectos ambientales que tienen que ser gestionados de una manera correcta y deben ser minimizados.

La razón principal para el uso de explosivos en el arranque y excavación de rocas es que los explosivos tienen una gran capacidad reaccionar dando lugar a una generación de gases a alta presión y temperatura que, al emplearse confinado en barrenos perforados en la roca, dan lugar a su transformación en energía mecánica. Además, es un producto mucho más barato en comparación con la utilización de martillos hidráulicos, trituradoras o cualquier otra herramienta utilizada para la rotura mecánica. Pero si la voladura no está correctamente diseñada, algunos efectos ambientales pueden hacer que ese procedimiento resulte incluso peligroso.

Aparte de las vibraciones producidas, como resultado de las voladuras se pueden producir ruido, polvo y daños estéticos y estructurales, en edificaciones en las zonas habitadas próximas. La vida animal, de la cual depende la población local, también puede ser afectada [29, 96]. Una identificación de los efectos producidos por voladuras y sus efectos, se muestran en la Figura 21.

Vibraciones	<ul style="list-style-type: none">- Daños a estructuras, incluso colapso.- Afección al bienestar de las personas.
Onda Aérea	<ul style="list-style-type: none">- Rotura de cristales.- Afección a las personas, incluso muerte.
Proyecciones	<ul style="list-style-type: none">- Daños a estructuras. Rotura de cristales.- Afección a las personas, incluso muerte.
Polvo	<ul style="list-style-type: none">- Afección al bienestar de las personas.- Calidad del aire.

Figura 21: Efectos ambientales asociados a las operaciones de voladura

Algunos autores suponen que una parte de esos efectos son eventos aleatorios [97], pero hay métodos y técnicas, basados en modelos empíricos y analíticos, que pueden usarse para predecir controlar y minimizar los potenciales efectos ambientales. Estos métodos tienen que ser utilizados en el diseño de voladura para definir las mejores prácticas aplicables. Además, con el uso de ciertas herramientas, tales como la digitalización del frente de voladura y la determinación de la dirección real de la perforación realizada, podría estudiarse el macizo rocoso para obtener la mayor cantidad de información posible para diseñar los parámetros de voladura correctamente.

3.7.7.1. Vibraciones

Cualquier voladura genera una perturbación del terreno en forma de onda sísmica en el suelo. Esta onda depende de las propiedades de la roca, las propiedades geotécnicas del macizo rocoso y el diseño de la voladura. Obviamente, cuanto mayor cantidad de explosivo es detonada, más vibraciones se generan y en función de la distancia de la voladura a la zona sensible (o estructura sensible), el alcance de las vibraciones en el terreno es diferente.

El efecto podría dañar las estructuras, incluso provocar el colapso de las mismas, y también puede afectar a la gente cercana que rodea el área de voladura. Para evitar este efecto cada país establece algunas normas para garantizar la seguridad de las personas y estructuras (edificios, estructuras industriales y estructuras también antiguas e históricas) [98].

Además de las normativas de obligado cumplimiento para hacer frente a la protección de estructuras frente a las vibraciones producidas por voladuras [98], existen algunas otras normativas específicas que establecen ciertas recomendaciones frente a la protección frente a las vibraciones generadas [99].

Se entiende por vibraciones los fenómenos de transmisión de energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio. El fenómeno de vibraciones queda caracterizado por una fuente o emisor, esto es, un generador de vibraciones, y por un objeto o receptor de las mismas. El fenómeno de las vibraciones se manifiesta mediante un movimiento ondulatorio.

La detonación de una masa de explosivo confinada en el interior de un barreno perforado en un macizo rocoso, genera de una forma casi instantánea un volumen de gases a una presión y temperatura extremadamente altos. Esta aparición brusca de una presión elevada sobre las paredes del barreno actúa como un choque o impacto brusco, que se manifiesta en forma de onda de deformación a través de la masa en torno al barreno. Esa onda de deformación / tensión transmitida es cilíndrica, en el caso de carga cilíndrica distribuida en el barreno, o esférica, en caso de carga puntual o esférica, aunque a considerable distancia del barreno con relación a su longitud puede considerarse la explosión reducida a un punto y en consecuencia

la onda de propagación como esférica. En definitiva, la tensión soportada por un elemento material será función inversa de la distancia.

A continuación se describe el fenómeno vibratorio generado por voladura de rocas en minería, así como los factores que influyen en su generación y posibles acciones de mitigación [100].

Ondas sísmicas

Aunque las ecuaciones clásicas de ondas elásticas son inadecuadas para describir el fenómeno de las vibraciones por efecto de una voladura, tal y como se manifiesta con sus problemas de atenuación, dispersión, cambio de longitud de onda y superposición de ondas, ha de considerarse que hasta la fecha es el mejor modelo simplificado de que se dispone para el análisis de este fenómeno. Se puede considerar, pues, que a efectos de las vibraciones en voladuras, sólo interesa la propagación de ondas en la zona exterior, en torno del barreno (zona elástica) y que en ella las únicas ondas significativas que se transmiten resultan ser ondas elásticas de baja energía.

Básicamente se pueden agrupar los tipos de ondas elásticas en dos grupos:

- Ondas internas, que se propagan por el interior del sólido rocoso en nuestro caso y dentro de las cuales encontramos: las ondas longitudinales, de compresión o principales P y las ondas transversales, de cizalladura o secundarias S.
- Ondas de superficie, que únicamente se transmiten por la superficie del material y entre las que se encuentran: las ondas Rayleigh R y las ondas Love L; son las principales, si bien existen las llamadas ondas acopladas y ondas hidrodinámicas.

Las ondas P se caracterizan por provocar la oscilación de las partículas en la misma dirección en la que la onda se propaga. Las ondas S se caracterizan por provocar la oscilación de las partículas en una dirección transversal a la dirección en que la onda se propaga.

Cuando las ondas internas generadas en el interior de un macizo rocoso alcanzan la superficie, son influidas por esta discontinuidad y aparecen ondas de superficie. Si se considera para su análisis que el eje X es el correspondiente al de la dirección principal de propagación, el eje Y al horizontal, perpendicular al X, y el eje Z al vertical perpendicular a los dos anteriores:

- Las ondas Rayleigh se propagan en el plano ZX, originando en dicho plano oscilaciones elípticas. Su efecto es de compresión, dilatación y cizalla. Su velocidad es aproximadamente 0.9 de las ondas transversales.
- Las ondas Love se propagan en el plano XY originando oscilaciones elípticas contenidas en dicho plano. Su velocidad es similar a la de las Rayleigh. La existencia de las ondas Love, está restringida a capas de terreno en contacto con la atmósfera y bajo las cuales existan otras capas en que la velocidad de las ondas transversales sea mayor que en la capa en cuestión. También pueden existir ondas

Love cuando la velocidad de las ondas S aumenta con la profundidad para los diferentes materiales.

Figura 22: Tipos de ondas sísmicas [100]

Se ha demostrado por medio de estudios de carácter avanzado que la energía sísmica de alta frecuencia es absorbida más rápidamente que la de baja frecuencia, de modo que la energía contenida en las ondas sísmicas está más concentrada en intervalos correspondientes a bajas frecuencias a medida que la distancia a foco generador aumenta. Hay que tener presente que en los análisis de vibraciones no suele llegarse a distinguir entre sí los diferentes tipos de ondas que llegan al geófono. La profundidad de los barrenos, que normalmente son de producción, es relativamente pequeña, lo que supone trenes de ondas internas de baja energía. Asimismo, los trenes de ondas llegan casi simultáneamente al geófono, pues la diferencia de velocidad entre ellos es pequeña, frente al pequeño espacio a recorrer hasta el geófono.

Medidas de las vibraciones producidas por voladuras

Es preciso hacer una distinción entre aspectos bien diferenciados del fenómeno de la vibración. Uno de ellos es la propagación o transmisividad de la vibración por el medio y otro es el movimiento propio que el paso de la vibración genera en las partículas del medio. Cabe entonces diferenciar entre dos tipos de velocidades:

- Velocidad de onda o de propagación es aquella con la que la vibración se propaga por el medio.
- Velocidad de partícula es aquella relativa a las oscilaciones que experimenta la partícula, excitada por el paso de la onda de energía vibratoria.

Como ya se ha señalado, una partícula sometida a una vibración, experimenta un movimiento oscilante del que sus parámetros medibles pueden ser desplazamiento, velocidad, aceleración

de partícula y la frecuencia del movimiento ondulatorio. Conociendo cualquier pareja de estos parámetros, se puede deducir el valor del resto, por integración y/o derivación. De todos los parámetros posibles de medida, con carácter prácticamente universal se toma la velocidad de vibración como el que mejor representa el nivel de vibración y los daños producidos en edificaciones. No obstante es imposible hoy día establecer un criterio fiable que no considere las frecuencias dominantes en la vibración. Las vibraciones reales no se corresponden a un movimiento armónico puro, pero cualquier señal recibida por el captador se puede representar como la suma de una serie de movimientos armónicos individuales.

Para recoger la oscilación generada por el terreno se emplean equipos de medida denominados sismógrafos, que constan de:

- Una serie de sensores o elementos para captar el ruido y las vibraciones del terreno transformándolos en impulsos eléctricos (micrófonos, velocímetros y acelerómetros).
- Un amplificador de la señal.
- Un módulo de memoria para el almacenamiento de datos
- Algunos modelos incorporan un sistema de impresión que visualiza y gestiona los datos.

Ley de transmisividad

De forma genérica, el nivel de vibración recibida en un punto, expresado como valor de velocidad de vibración V , es función directa de la carga de explosivo empleado Q , e inversa de la distancia D entre el punto de disparo y el punto de registro. Esto se puede expresar de forma genérica:

$$V = K \cdot Q^{\alpha} \cdot D^{\beta} \quad (9)$$

Siendo:

- V = Velocidad de vibración (mm/s)
- Q = Carga de explosivo (kg)
- D = Distancia (m)

K , α y β son constantes que engloban la geología del terreno, la geometría de las cargas, las diferencias de cota entre los puntos de disparo y de medida, el tipo de propagación, el nivel de “aprovechamiento” de la energía en generar vibraciones, etc.

Por lo tanto, uno de los objetivos de un estudio de vibraciones es hallar el valor de las constantes K , α y β a través de un ajuste mínimo-cuadrático, realizado con los valores V , Q y D tomados en los ensayos.

El coeficiente de correlación “r” va a indicar si los puntos (V, Q, D) tienen alguna relación entre sí o no. Es decir, si se ajustan a una ley o no. Dicho coeficiente alcanza el valor máximo 1 cuando los puntos se ajustan perfectamente a la ley y es 0 cuando los puntos se encuentran caóticamente repartidos.

Con objeto de tener una idea visual del ajuste de los puntos al plano, se representan en una gráfica de escalas logarítmicas los valores de V frente a los de Dr:

Siendo Dr la denominada “Distancia reducida” y que viene definida por la expresión,

$$Dr = \frac{D}{Q^{\alpha/\beta}} \quad (10)$$

Dado que,

$$\log V = \log K - \beta \cdot \log \left(\frac{D}{Q^{\alpha/\beta}} \right) \quad (11)$$

La representación de dichos puntos ha de tomar una forma aproximadamente rectilínea.

La aplicación de la Distancia Reducida es un modo de normalizar los valores obtenidos de diferentes disparos y distancias de modo que puedan compararse y representarse conjuntamente de manera gráfica.

Factores que afectan a las vibraciones

Los parámetros que afectan a la generación de vibraciones generadas por voladura se enumeran a continuación

(a) Cantidad de explosivo que detona simultáneamente

El factor más intuitivo que influirá en la generación de vibraciones producidas por voladuras es la cantidad de explosivo detonado en la voladura a la vez. En cambio, este valor no coincide con la carga total de la voladura, puesto que debido a la secuencia de detonación diseñada, no detonan todos los barrenos en el mismo instante. La vibración generada por dos barrenos detonados con un retardo de más de 8 ms entre sí, no supone una mayor vibración en el terreno, puesto que las ondas no se solapan y se pueden considerar disparos independientes. Así, la vibración generada por el conjunto de barrenos que detonan con un tiempo de retardo de 8 ms o menos entre sí, es la suma de la vibración generada por cada barreno individual, ya que implica un solape de las ondas de vibración, y, por tanto, un mayor valor en la vibración generada. Con este concepto, se denomina carga operante a la suma de todos los barrenos que detonan en una ventana de

8 ms, suponiendo, en este caso que el efecto sería el equivalente a la vibración generada por la suma de dichos barrenos.

(b) Grado de confinamiento

El grado de confinamiento influye en la generación de vibraciones puesto que un mayor grado de confinamiento implica una mayor dificultad en fragmentar y mover la roca, por lo que la energía generada por la detonación se transformará en energía sísmica que se transmitirá por el terreno. Visto desde el lado opuesto, un menor grado de confinamiento, implicará que la energía de la detonación se transformará con mayor facilidad en energía de fragmentación así como en energía mecánica empleada en desplazar la roca volada.

(c) Características de la roca

Otro factor que tiene gran influencia en la generación de vibraciones es el comportamiento de la roca en la cual se ha producido la alteración sísmica. Esto es debido a que cada tipo de roca transmite de manera diferente las vibraciones, debido principalmente a su composición y a su densidad.

La densidad de la roca hace que cuanto mayor sea la densidad del medio, mayor capacidad de transmitir las ondas de vibración.

En relación a la capacidad de transmitir las ondas de vibración, existe un parámetro que puede determinarse en campo para cada tipo de roca que es la VELOCIDAD SÍSMICA del macizo rocoso. Este parámetro se obtiene mediante la generación de un impulso en el macizo rocoso y midiendo la respuesta a una distancia conocida. Midiendo el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia se obtiene la velocidad de transmisión de las ondas.

(d) Distancia al lugar de la detonación

Resulta evidente que un factor fundamental en la determinación de las vibraciones producidas es la distancia al lugar de la detonación. Así, es clave escoger los puntos de vibración sobre todo cuando estos puntos son puntos especialmente sensibles a ser afectados por las vibraciones en el terreno.

De este modo, es un factor determinante en el diseño adecuado de la voladura cuando el lugar de disparo se encuentra cerca de núcleos habitados o instalaciones industriales especialmente sensibles. En el otro extremo se situaría el caso en el que la voladura se encuentra en lugares aislados o remotos, donde una mayor generación de vibraciones no influye de manera notable en el entorno.

(e) Naturaleza y características geológicas del terreno

La generación de vibraciones por voladura también se ve afectada por la estructura geológica del macizo rocoso, puesto que una gran fracturación o estratificación, hace que

existan multitud de planos de reflexión de las ondas, actuando cada contacto entre estratos, o entre juntas, como un plano de discontinuidad del medio.

Por otro lado, cada tipo de roca tiene un comportamiento diferente en función de las características tensionales del medio. En este aspecto existen rocas más plásticas y otras más elásticas, de modo que son capaces de absorber las ondas vibratorias de modo diferente, y, por tanto, de transmitir las también de modo diferente.

Acciones posibles para reducir las vibraciones producidas por voladuras

Las acciones posibles de realizar para reducir las vibraciones generadas por la voladura se enumeran a continuación:

- Reducir la carga operante:
 - Aumentar el número de detonadores y microrretardos
 - Utilizar explosores secuenciales (con detonadores eléctricos).
 - En casos especiales, usar detonadores electrónicos.
- Reducir la carga por barreno:
 - Reducir el diámetro.
 - Utilizar cargas espaciadas en los barrenos.
 - Utilizar cargas de diámetro inferior al del barreno.
 - Reducir la altura de banco.
- Reducir el grado de confinamiento de las cargas:
 - Utilizando barrenos inclinados.
 - Cerrando la malla.
 - Adecuando la secuencia de encendido.
- Crear una discontinuidad entre la estructura a proteger y la voladura.

3.7.7.2. Proyecciones

Las proyecciones se pueden definir como el efecto producido por un fragmento de roca lanzada hasta una distancia o con un alcance no deseable de acuerdo con las características y la finalidad de la voladura. Por tanto, hay dos zonas de proyecciones que se pueden denominar "normal" y "excesiva". La zona de proyecciones "normal" se refiere a la zona donde se espera que se produzcan las proyecciones. Es la zona de la que son evacuados antes de la voladura de personal y se acordonó durante la explosión.

Las proyecciones de roca pueden suponer un serio peligro asociado a las voladuras. Muchos de los accidentes de voladuras donde ha habido heridos se han debido a proyecciones de roca que han sobrepasado la zona de protección [101].

Las consecuencias de las proyecciones podrían no ser importantes si los fragmentos de roca no alcanzan estructuras externas o edificios de la mina o su entorno. Pero esos fragmentos podrían dañar las estructuras internas u otros bienes, tales como la planta de tratamiento, la maquinaria o incluso las oficinas de mina. El peligro se agrava si las proyecciones superan los límites de la explotación.

La mayoría de los fragmentos producidos en una voladura no se desplazan más allá de 40 o 50 metros. Sin embargo, siempre hay algunos que, por circunstancias especiales, salen lanzados a mucha mayor distancia (100 m e incluso hasta 1000 m). Normalmente, un correcto diseño de la voladura es suficiente para acotar de forma efectiva este riesgo. A este respecto, habrá de tener en cuenta lo siguiente [100]:

- Que la distancia al frente de los barrenos y la separación de éstos entre sí estén adecuadamente dimensionadas.
- Que la secuencia de encendido sea también correcta.
- Que el explosivo se haya repartido uniformemente a lo largo del barreno evitando sobre todo la acumulación del mismo en zonas próximas a la superficie.

Las posibles fuentes de generación de proyecciones se muestran en la Figura 30.

Figura 23: Casos de posible riesgo de proyecciones (Modificado de [102])

(a)Frente irregular; (b)Sobrecarga de barrenos; (c)Zonas de acumulación de explosivo; (d)Mala secuenciación

No obstante, en aquellos casos en que la voladura tuviera lugar en un lugar próximo a zonas de riesgo, será necesaria la adopción de medidas especiales como puede ser la colocación en la zona de voladura de tela metálica, lona resistente, neumáticos viejos o cualquier otro elemento que sirva de protección frente a las proyecciones.

Según Workman (1994) [101], la proyección de rocas en voladuras responde al modelo de lanzamiento de un proyectil, es decir del tiro parabólico, que tiene como valor clave la velocidad inicial de lanzamiento. La velocidad a la que sale un fragmento de roca situado en el

talud del banco depende de diversos factores, tales como las características del material, distancia de la carga de explosivo al frente libre, concentración lineal de carga de explosivo en el barreno, tipo de explosivo, entre otros.

Según el modelo estudiado por Workman, se establece que las proyecciones de roca no alcanzan más de 3000 pies, es decir, 914,4 metros. Sin embargo, su modelo no tiene en cuenta ni la resistencia del aire, ni la velocidad ni la dirección del viento.

Por otro lado, Hustrulid (1999) [102] describe otra manera de estimar el alcance de los fragmentos de roca provenientes de una voladura, en función del tamaño de fragmento y el diámetro de barreno, donde el alcance de los fragmentos de roca puede ser establecido de acuerdo al diagrama representado en la Figura 24.

Figura 24: Estimación del alcance de las proyecciones [102]

En el diagrama de la Figura 24 se puede observar que el alcance máximo para un diámetro de 5 pulgadas es de unos 900 metros, solo superando los 1000 metros de alcance en diámetros de perforación de 10 pulgadas.

3.7.7.3. Onda aérea

La onda aérea se podría definir como la sobrepresión de aire producida por cualquier detonación. En las operaciones de voladura a cielo abierto el explosivo tiene que ser confinado en la roca, pero siempre una fracción de la energía se transforma en ondas que se transmiten en el aire. Estas ondas generan sobrepresiones de aire que pudieran causar daños en los edificios causando principalmente grietas en vidrios y ventanas.

Alguna de las medidas que pueden adoptarse para aminorar esta onda aérea son las siguientes [100]:

- Evitar la detonación de cordón detonante o cartuchos de explosivo al aire libre o sin un grado de confinamiento suficiente.
- Realizar un retacado eficaz y de suficiente longitud.
- Evitar las posibles fugas de gases por fracturas o grietas.
- Reducir al mínimo la cantidad de explosivo que detona simultáneamente y evitar la superposición de las ondas procedentes de los distintos barrenos utilizando tiempos de retardo entre los mismos que superen el valor $2S/c$, siendo “S” la separación entre barrenos y “c” la velocidad del sonido en el aire.
- Aplazar la voladura cuando las condiciones climáticas sean adversas (cielo nuboso o con niebla, vientos fuertes o en el momento del día en que la temperatura está descendiendo).

3.7.7.4. Integración de la operación minera en la reducción de los efectos de las voladuras en el entorno

Aunque pueda parecer que los efectos de las voladuras en el entorno son acción única y exclusivamente de las personas involucradas en el diseño y ejecución de la misma, el proceso minero completo tiene influencia en la obtención de unos resultados exitosos.

Cabe destacar que una pequeña desviación de los resultados esperados en la voladura puede generar afecciones que hagan inviable la continuación de los trabajos.

La no predicción de los resultados esperados o bien la falta de información sobre los medios con los que se está trabajando, así como la falta de rigor en alguna de las actividades de la explotación pueden generar graves incidentes, o incluso accidentes que pueden afectar a las instalaciones, edificaciones, o incluso a las personas, involucradas o no en el proceso minero.

Así, algún aspecto que pase desapercibido durante la etapa de diseño y ejecución de las voladuras pueden ocasionar graves afecciones en forma de vibraciones, onda aérea o proyecciones, dando lugar a graves daños materiales y personales.

Estos aspectos clave, que den lugar a situaciones indeseadas pueden tener lugar por varios motivos:

- Falta de formación
- Falta de información
- Falta de rigor en los trabajos
- Factores externos

La falta de formación tanto del personal involucrado en la ejecución de la voladura, así como la falta de conocimiento de las técnicas para desarrollar otras actividades, como estudios

geotécnicos, interpretaciones geológicas, etc. hacen que haya datos de partida que no se corresponden con el modelo empelado en el diseño de la voladura.

La falta de información sobre el terreno que se está perforando, bien sea el macizo rocoso, bien sea el frente de voladura, puede generar situaciones de riesgo evitables con una simple auditoría de trabajos a realizar. Del mismo modo, una falta de comunicación entre diferentes fases de la explotación, por ejemplo falta de información del desarrollo de la perforación para los ingenieros a cargo del diseño de la voladura, puede hacer que no se tengan conocimientos de zonas estratificadas débiles, de fragmentación excesiva, con presencia de cavernas en el caso de macizos calizos, etc., haciendo que el diseño de la voladura no sea el más adecuado.

Una falta de rigor en los trabajos, ocasionada en ciertas ocasiones por falta o escasez de personal, o por la presencia de personal mal formado, puede dar lugar a que haya una falta de rigor en los trabajos, con la consecuente existencia de información sesgada o incompleta para los equipos de diseño de voladuras.

Además de todo lo anterior, puede haber factores externos como por ejemplo factores meteorológicos que hagan que las condiciones de trabajo no sean las óptimas. En otras ocasiones, las presiones ejercidas sobre el personal por una premura en la ejecución de la voladura pueden ocasionar situaciones de riesgo perfectamente evitables.

3.7.8. Generación de árboles de fallos para la gestión de efectos ambientales generados por voladuras.

Por los motivos descritos se han desarrollado mediante la técnica de generación de árboles de fallos, las condiciones para evitar, o minimizar los efectos de las voladuras en el entorno.

Así, partiendo de las situaciones que pueden darse en este aspecto, mediante puertas lógicas, se establecen las zonas de actuación para evitar las afecciones por vibraciones, proyecciones y onda aérea.

Se representan a continuación tres árboles de fallos para ayudar en la evaluación de cada situación delicada de modo que puedan evitarse, o minimizarse los efectos producidos por voladuras. La leyenda de las puertas usadas en la generación de los árboles de fallos se muestran en la Figura 25.

Figura 25: : Códigos empleados en los árboles de fallos [100, 103]

3.7.8.1. Vibraciones. Árbol de fallos

Figura 26: Vibraciones. Árbol de fallos [100, 103]

3.7.8.2. Proyecciones. Árbol de fallos

Figura 27: Proyecciones. Árbol de fallos [100, 103]

3.7.8.3. Onda aérea. Árbol de fallos

Figura 28: Onda aérea. Árbol de fallos [100, 103]

3.7.9. Residuos

Los residuos generados en operaciones mineras pueden dividirse en cuatro categorías: [41, 96]

- Recubrimiento: Se denomina así el suelo y roca que es retirado para alcanzar el depósito mineral.
- Estéril: Es la roca que es extraída del depósito mineral pero que tiene una ley que no hace posible su aprovechamiento en la planta de tratamiento.
- Relave: Es el residuo resultante del procesamiento de la mena mineral para producción de mineral concentrado.
- Residuos del mineral lixiviado en pilas: Es la roca remanente del proceso de lixiviación en pilas.

Estos residuos generalmente se depositan en escombreras y/o balsas. El mayor efecto a considerar en la eliminación de residuos mineros es el drenaje de aguas ácidas de mina [104].

En esta descripción de residuos no se incluyen aquellos residuos industriales propios de cualquier actividad, tales como aceites usados, que deben ser gestionados de manera adecuada tal y como prescribe la legislación vigente y en función de las características de cada uno.

Las características de los residuos mineros dependen del origen de la actividad minera. En el caso de los áridos, de los minerales industriales, de las rocas ornamentales (granito, mármol), etc., sus residuos mineros suelen ser inertes; en el caso de la minería metálica, podrían clasificarse como peligrosos, tal y como lo refleja la Lista Europea de Residuos, ya que son estériles que, con posterioridad a su almacenamiento en una estructura tipo escombrera o balsa de estériles, generan ácido procedentes de la transformación de sulfuros (Código LER 01 03 04); otros estériles pueden contener sustancias peligrosas (Código LER 01 03 05) y en otros casos pueden contener sustancias peligrosas procedentes de la transformación física y química de minerales metálicos. (Código LER 01 03 07).

Para minimizar el gran volumen de residuos que se produce en cualquier explotación minera, se aplican métodos y técnicas de prevención. Estas técnicas son de especial relieve en la fase de investigación (geofísica, sondeos, etc.) ya que permiten evitar la apertura de frentes de explotación en zonas no adecuadas por contener óxidos, fracturas, etc., que posteriormente sería necesario abandonar con la consiguiente producción de residuos. En la fase de operación o explotación se aplican las tecnologías más avanzadas (Mejores Técnicas Disponibles) que permiten racionalizar y aprovechar mayores concentraciones de mineral.

3.7.10. Drenaje de aguas ácidas de mina

El drenaje ácido de mina (AMD) se produce en aproximadamente el 70% de las minas del mundo. Es un proceso natural que da lugar a la contaminación del agua cuando la roca que contiene minerales de base sulfurosa está expuesta al agua y oxígeno [105, 106].

Esta combinación crea el agua ácida que disuelve los metales residuales de roca expuesta en minas a cielo abierto, trabajos subterráneos o acopios. Debido a que el agua se genera a partir de fuentes naturales tales como lluvia, nieve derretida, agua subterránea, o acuíferos, el drenaje ácido de mina se puede producir tanto en minas activas como en minas ya clausuradas, lo que hace que sea necesario una monitorización y tratamiento a largo plazo [105].

El drenaje ácido es un problema global, lo que lleva a la destrucción ecológica de las cuencas hidrográficas y la contaminación de fuentes de agua para uso humano por el ácido sulfúrico y metales pesados, incluyendo arsénico, cobre y plomo. Una vez que la roca que contiene el elemento generador de ácido se tritura y se expone al oxígeno y el medio ambiente de la superficie, la generación de ácido es muy difícil de contener o detener, y puede continuar durante decenas o miles de años hasta que se agoten los minerales de sulfuro disponibles.

Los metales disueltos por los efluentes ácidos contaminados, en muchos casos, tienen una concentración tal que no pueden sobrevivir en ellos nada más que microbios. Aunque la minería es, con mucho, la principal causa de este tipo de lixiviación ácida, el proceso también puede ocurrir durante las alteraciones de los terrenos no mineros, como la construcción, o incluso de forma natural en algunos entornos, los ejemplos de los fenómenos más generales de "drenaje ácido de roca" (ARD) [107].

El drenaje ácido es a menudo fomentado por un circuito de retroalimentación biológica. Una vez que comienza el drenaje ácido, ciertos microbios prosperan en el ambiente ácido. Estos microbios aumentan la producción de ácido sulfúrico a partir de la roca circundante, contaminando aún más el entorno aguas abajo para otros organismos. Este bucle de retroalimentación es un componente importante en todos los casos más severos de drenaje ácido de minas [107].

El aumento de la acidez causada por drenaje ácido de minas tiene una serie de efectos negativos dependiendo de la gravedad del cambio de pH. Muchos sistemas de ríos y antiguos sitios mineros son totalmente inhóspitos para la vida acuática, con la excepción de las bacterias "extremófilas". Además, la acidez aumentada reduce la capacidad de las corrientes para amortiguar contra más cambios químicos [107].

Como el drenaje de aguas ácidas de mina se plantea como uno de los problemas ambientales más graves en la industria minera, sus causas, predicción y tratamiento se han convertido en el origen de una serie de iniciativas de investigación por encargo de los gobiernos, la industria

minera, las universidades y/o centros de investigación. Su impacto ambiental se puede minimizar en tres niveles básicos de actuación [108]:

- A través de la prevención primaria del proceso generador de ácido.
- Por medio de un control secundario, que implica la implementación de medidas de prevención de la migración de drenaje ácido
- Un control terciario, que consiste en la recogida y tratamiento de los efluentes.

Para detener la formación de ácido sulfúrico, se debe evitar que la roca estéril y los residuos de una mina entren en contacto con el oxígeno. El oxígeno puede provenir de corrientes de agua o aire. Las técnicas para mantener los residuos separados de corrientes de oxígeno incluyen sumergir los residuos bajo agua, sellado por medio de una barrera sintética, o enterrarlos bajo tierra [107].

Las grandes minas de manera general suelen utilizar la técnica de confinar bajo agua para aislar del oxígeno las potenciales fuentes generadoras de ácido para reducir la velocidad a la que el oxígeno interactúa con el material. La formación de ácido sulfúrico se hace más lenta, pero la reacción no se bloquea totalmente. En algunas instalaciones de residuos que utilizan este método no se requiere de tratamiento de agua activo. Sin embargo, en muchos casos, el agua que fluye fuera de las balsas todavía necesita ser tratada para neutralizar la acidez antes de que sea liberada en el medio ambiente [107].

El potencial de drenaje ácido es una cuestión clave. La respuesta determinará si la propuesta de un proyecto minero es o no es ambientalmente aceptable. Cuando los materiales (tales como los taludes de las minas a cielo abierto y hastiales de las minas subterráneas, relaves, escombros o desechos de roca, lixiviados y materiales de desecho de la lixiviación) se excavan y se exponen al oxígeno y al agua, se puede formar ácido si el hierro y materiales sulfurosos (especialmente la pirita) son abundantes y hay una insuficiente cantidad de material que lo neutralice para contrarrestar la formación de ácido. El ácido se convertirá en lixiviado o disolverá metales y otros contaminantes que se encuentran en los materiales minados y formará una solución ácida con alto contenido de sulfatos, rica en metales (incluyendo elevadas concentraciones de cadmio, cobre, plomo, zinc, arsénico, etc.). El lixiviado de compuestos tóxicos como el arsénico, selenio y otros metales, puede ocurrir aun en ausencia de condiciones ácidas. Compuestos de cianuro y nitrógeno (amonio, nitrato, nitrito) pueden también detectarse en las aguas de zonas mineras, originados por la lixiviación y las voladuras. [29]

El drenaje ácido y la lixiviación de compuestos contaminantes es la fuente más importante de impactos en la calidad de agua relacionadas con la minería metálica [82, 109].

Las causas del drenaje de agua ácida de mina son muy conocidas. Todas las fuentes de generación tienen que ver con la meteorización natural de residuos mineros o bien de rocas enriquecidas en minerales metálicos sulfurosos [82]. El drenaje de aguas ácidas de mina puede

producirse en aquellos lugares en los cuales una roca sulfurosa ha sido expuesta al aire como resultado de operaciones mineras, construcción, u otras actividades [82, 110, 111]:

- Drenaje de excavaciones subterráneas.
- Escorrentía de labores a cielo abierto.
- Escombreras de residuos de actividades mineras.
- Residuos de proceso.
- Apilamientos de menas.
- Residuos del mineral lixiviado en pilas.

La contaminación por drenaje de aguas ácidas de mina es un problema presente en muchos países que han tenido una industria minera en un pasado no muy lejano así como a aquellas naciones que tienen explotaciones mineras en activo actualmente. La prevención de la formación o la migración de drenaje de aguas ácidas de mina de en origen se considera generalmente que es la opción preferible. Sin embargo, en muchos lugares es necesario recoger, tratar y descargar el agua ácida de mina. Su recogida y su tratamiento es muy caro y el resultado no siempre es efectivo y satisfactorio, por lo tanto, se deben hacer esfuerzos para controlar y prevenir el proceso de formación de drenaje de aguas ácidas de mina y la migración de metales pesados [112].

El drenaje ácido afecta a los sistemas lóticos de muchas maneras. Esto da lugar a múltiples presiones, tanto directas como indirectas, en los organismos que componen la estructura de la comunidad del ecosistema. Estos efectos pueden ser categorizados de una manera sencilla como químico, físico, biológico y ecológico, aunque el impacto global sobre la estructura de la comunidad es la eliminación de las especies, la simplificación de la cadena alimentaria reduciendo así significativamente la estabilidad ecológica [104].

Figura 29: Efectos más importantes del drenaje ácido de mina [104]

El impacto del drenaje de agua de mina es difícil de predecir debido a la variabilidad de la descarga de las balsas y la composición que varía estacionalmente, el efecto de la escorrentía superficial de las zonas expuestas de las minas durante las fuertes lluvias, y el efecto de las características de la descarga del agua de captación que afectan a la dilución y la concentración de la materia orgánica en el agua y sustancias quelantes de metales solubles. La evaluación es también difícil debido a la complejidad de los impactos, aunque la diversidad y la abundancia son variables clave para la evaluación biótica [104].

Los avances en la predicción del drenaje de aguas ácidas incluyen el desarrollo de programas de simulación por ordenador, las evaluaciones químicas, y el análisis de las reacciones ácido-base que se utilizan para prever si es probable que se formen aguas ácidas en una mina [113]. Las operaciones mineras que exponen minerales de base sulfurosa está expuesta al agua y oxígeno no siempre conducen a la formación de aguas ácidas, porque el mineral puede contener una alta proporción de minerales tampón, tales como cal, calcita, carbonato o bicarbonato, que son capaces de neutralizar las aguas ácidas [106, 111]. Debido a que la mineralogía de residuos sulfúricos y minerales es muy variada y es única para cada depósito, la predicción de la formación de aguas ácidas requiere un adecuado análisis de la física, geológica, geoquímica y características mineralógicas de la mina [111].

Las empresas mineras trabajan cada vez más en evaluar el potencial de formación de aguas ácidas en futuros proyectos de explotación y proporcionar planes detallados para prevenir o

contener el drenaje de aguas ácidas en todas las fases de operación de la mina como parte del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental [114, 115].

Además otro factor que afecta al drenaje de aguas ácidas de minas es el cambio climático, que hace que varíen las reacciones por las que se movilizan los contaminantes, debido a los cambios en las condiciones hidrológicas, por lo que la capacidad de generación de aguas ácidas de mina varía, por tanto, en el tiempo [116, 117].

Existen métodos para realizar una estimación de la movilidad de los contaminantes que están basados en determinar cuantitativamente el contenido mineralógico de los minerales o rocas en cuestión. Usando técnicas de mineralogía cuantitativa en conjunción con ensayos de laboratorio estáticos y dinámicos se pueden obtener resultados que clarifiquen y ayuden a la interpretación del potencial de drenaje de aguas ácidas de mina [118].

4. METODOLOGÍA

4.1. Evaluación del impacto ambiental en minería. Técnicas aplicables

Debido a las características de los proyectos mineros, que por su naturaleza llevan asociadas modificaciones de la morfología y características del terreno fundamentalmente cuando se trata de explotaciones a cielo abierto, pero también cuando se trata de explotaciones de interior, es necesario identificar el escenario inicial donde se va a desarrollar el proyecto junto con el escenario que se va a presentar una vez terminado tal proyecto. Del mismo modo, es necesario el establecer cuál será la afección global al medio ambiente durante el desarrollo del mismo.

Por otro lado, debe recordarse que el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) se ha establecido como una herramienta de uso ampliamente aceptado en la industria y lleva siendo empleado desde hace más de 40 años [12] como un proceso de planificación, de toma de decisiones y de gestión que abarca todo el ciclo de vida de un proyecto minero. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que el EIA es un estudio de solo una parte del proceso y que normalmente se lleva a cabo en la etapa de estudio de la viabilidad y diseño o, a veces incluso en la etapa de estudio conceptual del desarrollo de una mina [29]. En éste sentido, puede decirse que el objeto del EIA es asegurar que los potenciales impactos adversos en el medio ambiente son previstos y contemplados para su corrección ya desde una etapa temprana del ciclo minero, con el fin de adelantarse a efectos negativos, tanto en el aspecto social como medioambiental durante la construcción y operación de la mina [12, 119].

El éxito de la evaluación ambiental depende de la implementación de las medidas de mitigación medioambiental y social acordadas durante la etapa de construcción de la mina. Una falta de continuidad entre el desarrollo del EIA y la consecuente gestión medioambiental parcialmente adecuada o incluso no adecuada que inexorablemente tendrá lugar durante el desarrollo del proyecto, reduce el EIA a un mero trámite administrativo para obtener las licencias o financiación necesarias pero no servirá para ofrecer las garantías que demandan las restantes partes interesadas.

La evaluación ambiental debería llevarse a cabo tan pronto como sea posible en el proceso minero para permitir que las medidas de mitigación ambiental puedan ser incorporadas ya desde la etapa de planificación minera. Una evaluación ambiental precisa y realizada a tiempo hará posible una toma de decisiones sobre una base de información adecuada y suficiente, que irá en la línea de asegurar el desarrollo sostenible, que es el fin último de la evaluación ambiental. Estas decisiones se relacionan con cambios en el diseño de mina, que normalmente se realizan en la etapa de Ingeniería de detalle y que se desarrolla después del estudio de viabilidad (Figura 30).

Estos cambios en el proyecto puede que justifiquen ser reflejados en el EIA, o pueden incluso justificar la elaboración de un nuevo EIA. Sin embargo, en la práctica estos cambios suelen realizarse una vez está aprobado el EIA, por lo que no estará sometido a la revisión por la Administración competente. No en todos los países está regulado el mecanismo de revisión del EIA, para velar por la validez de los cambios introducidos y la consecuente consistencia del nuevo EIA. Y además, no debe olvidarse que aun teniendo el mismo nombre, el procedimiento administrativo y de gestión de un EIA puede cambiar y ser radicalmente diferente de un país a otro.

Figura 30: Relación entre fases y toma de decisiones en el desarrollo de un proyecto minero [120]

Tal y como se desprende de la Figura 31, el EIA no es un simple estudio, sino que es un proceso, que comienza en los primeros estadios del desarrollo de un proyecto minero, se

somete a modificaciones para su adaptación a las condiciones susceptibles de cambiar en el tiempo, y continúa durante todo el desarrollo del mismo, hasta sus últimas etapas.

Figura 31: Relación entre Evaluación ambiental y el ciclo de un proyecto minero Modificado de [12]

A este respecto, se consideran una serie de premisas para asegurar la calidad del desarrollo de un Estudio de Impacto Ambiental, según Raff [121]:

1. El estudio no debe restringirse a los efectos ambientales específicos de un lugar.
2. El estudio debe contener una serie de alternativas de acción y la implicación ambiental de cada una.
3. Los grandes proyectos deben ser evaluados, además de las fases sencillas de las que constan.
4. El proyecto no debe ser segmentado.
5. Los plazos deben ser viables: el alcance de las alternativas que deben ser incluidas en el EIA deben limitarse a alternativas realistas que estén razonablemente disponibles a disposición de las personas encargadas de tomar las decisiones en cada momento.
6. Debe incluirse la evaluación de la alternativa de “no hacer nada”.
7. El EIA debe ser realmente una investigación y no solamente una disposición de alternativas posibles en favor de una decisión ya tomada.
8. Los efectos ambientales no debe ser disgregados solamente porque son difícilmente identificables o cuantificables.

9. El EIA debe ser una visión dura y crítica de las consecuencias medioambientales del proyecto. Mientras que un EIA puede que no sea perfecto, esto no quiere decir que sea superficial, subjetivo o no informativo.
10. Los hallazgos de un EIA deben ser presentados en un lenguaje claro y debe explicar la metodología empleada.

Basándose en estos principios se debe tener en cuenta que los recursos para el desarrollo de un EIA son limitados.

4.1.1. Técnicas aplicables

Existen multitud de técnicas ampliamente estudiadas para la determinación el impacto ambiental [29, 51]. En el ámbito de esta Tesis se establece que las técnicas aplicables más utilizadas para predecir los impactos ambientales pueden ser, entre otras [17]:

- Listas de verificación.
- Matrices de impacto.
- Diagramas de flujo y redes.
- Modelos matemáticos y estadísticos.
- Mapas.
- Sistemas de información geográfica (SIG).

Las listas de verificación (checklists) son especialmente útiles en la fase de definición del alcance del estudio de impacto ambiental para identificar impactos clave y asegurar que no se pasan por alto. Pueden incluir información como requisitos de los datos a obtener, opciones de estudio, preguntas por responder y los umbrales legales, pero en general no son adecuadas para un análisis detallado. Pueden tener varios usos: para identificar impactos y relaciones causa-efecto entre varias fuentes de impacto y los impactos; para relacionar características como pueden ser la magnitud y extensión del impacto, etc.

Las matrices de impacto son un método simple y transparente para comparar y clasificar objetos, como pueden ser los receptores y fuentes de impactos. Se puede asignar a cada objeto una puntuación en función de varios criterios, así como en escalas diferentes. Este método puede ser usado como herramienta de evaluación de la importancia relativa de objetos en varios contextos, incluyendo la determinación del alcance del estudio, predicción de impactos, establecimiento de alternativas al proyecto. Sin embargo, no sirve para detectar superposición y/o interacción de impactos con diferente ponderación. A menos que estén basadas en datos cuantitativos son desarrollos subjetivos y están sujetas al punto de vista y criterio del equipo que realice el estudio, como se ha comentado más extensamente en la página 22.

Los diagramas de flujo y redes pueden ser útiles para la identificación de relaciones causa-efecto entre fuentes de impacto o bien entre efectos primarios y secundarios. Sin embargo no pueden cuantificar las magnitudes de los impactos y sus efectos.

Los modelos matemáticos y estadísticos están basados en funciones matemáticas o estadísticas que se aplican para calcular los valores cuantitativos determinísticos o probabilísticos a partir de datos de entrada numéricos. Van desde las formas simples, que pueden ser empleados con una calculadora o una hoja de cálculo informática, a los modelos informáticos sofisticados que incorporan muchas variables.

El uso de mapas es esencial. Los mapas pueden indicar características tales como áreas de impacto y la ubicación y extensión de los puntos sensibles. El uso de mapas superpuestos en los que se puedan combinar e integrar dos o tres mapas con información a modo de "capas", es el más extendido para el estudio de diferentes impactos y/o diferentes componentes ambientales o ubicaciones.

Para ello, es muy útil el uso de herramientas informáticas como son los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS por sus siglas en inglés), que pueden gestionar gran número de variables en bases de datos referenciadas geográficamente, al tiempo que se pueden usar junto con otros sistemas (como pueden ser sistemas expertos o modelos de simulación) como un medio de analizar datos cuantitativos y resultados de modelización.

4.2. Nuevo paradigma del análisis ambiental

El desarrollo de los estudios que analizan la alteración del medio ambiente necesita de un conocimiento exhaustivo de las técnicas a emplear, que en el caso de la explotación de recursos minerales pasa por conocer tanto el ciclo de desarrollo de un proyecto minero como las operaciones que intervienen en cada una de sus fases.

Puede decirse que en un proyecto minero existen multitud de actores con diferentes puntos de vista y con diferentes intereses en el proyecto, por lo que en ciertas ocasiones es posible que la mejor solución, ambientalmente hablando, sea contrapuesta a la mejor técnica minera disponible para un determinado yacimiento.

En este escenario, la selección del método de explotación pasa por la integración de tres aspectos, que son obligatoriamente complementarios: tecnología, economía y medio ambiente (Figura 32).

Si además se están integrando las buenas prácticas relacionadas con la sostenibilidad en el proyecto minero, se tiene que integrar el aspecto social y las prácticas eficientes, para así lograr el escenario adecuado de trabajo [14].

Figura 32: Aspectos que intervienen en la selección del método de explotación [60]

Si en este punto se procede al desarrollo de la estimación de cuál será la afección ambiental, tal y como marca la legislación, se trabaja desde el punto de vista de cuáles son las fuentes generadoras de impacto ambiental. Es decir, el objeto de estudio es el proyecto minero y el primer paso para este estudio será identificar y definir tal proyecto. A pesar de que este paso pueda parecer relativamente simple, definir un “proyecto” para los propósitos de una EIA puede llegar a ser complejo y hasta controvertido si un proyecto minero es grande, tiene varias fases o, involucra varios emplazamientos [29]. En este escenario, se trabajará para elaborar un análisis medioambiental de la operación, aplicando las técnicas y métodos desarrollados en capítulos anteriores y, como se ha comentado anteriormente, uno de los primeros pasos será la identificación de las fuentes generadoras de impacto (Figura 33).

Figura 33: Análisis ambiental centrado en las fuentes generadoras de impacto ambiental

Este método de trabajo es el más extendido y aceptado tanto por empresas mineras como por organismos reguladores, y es de gran utilidad para el rápido desarrollo de los estudios de evaluación de impacto ambiental. Sin embargo, en la gran mayoría de técnicas empleadas intervienen aspectos subjetivos, que ante la falta de criterios de comparación, tal y como se ha descrito en el Apartado 3.6, no se pueden emplear para determinar el nivel de impacto ambiental de varias operaciones mineras que coexistan en un mismo área.

Así, el nuevo paradigma propuesto se basa en cambiar el punto de vista del estudio ambiental, y centrarlo en el área receptora de impactos. Esta área se puede denominar como “área

sensible” ya que será aquella que sea más susceptible de ser afectada por las explotaciones cercanas. Esta área puede ser bien un núcleo de población, una zona de interés ecológico, arqueológico, industrial, o bien una zona de cualquier otro carácter, pero que siempre se identificará con el área a proteger en cada caso.

Figura 34: Análisis ambiental centrado en las áreas receptoras de impacto ambiental

En este nuevo planteamiento del estudio ambiental se cambia el alcance del análisis, centrándolo en un único punto, pero que recibe alteraciones ambientales de varias fuentes generadoras de dichos impactos.

La ventaja que ofrece este planteamiento es que permite conocer si una explotación genera mayor impacto ambiental que otra y, gracias a ello, se podrán exigir diferentes niveles de actuación o protección a cada una de las explotaciones.

El nuevo planteamiento no tiene como finalidad actuar sobre las fuentes generadoras de impacto para eliminar, o minimizar la potencial afección ambiental tal y como marcaría el procedimiento estandarizado de evaluación de impacto ambiental, sino que se basa en la optimización de la gestión a escala regional, que permite comparar explotaciones entre sí. Por tanto, ambos planteamientos no se exponen como excluyentes, sino como complementarios para un óptimo proceso de análisis ambiental. Los resultados de ambos planteamientos deberían coincidir, teóricamente, solo en el caso de la aplicación exacta de los mismos criterios empleados en la elaboración de estudios de impacto ambiental en una misma área de influencia. Esto solo sería posible si hubiera un marco regulador que incluyeran una serie de criterios objetivos, comparables y normalizados de aplicación universal.

Este aspecto supondría un alto grado de intervencionismo por parte de los organismos reguladores, que debieran establecer unos criterios válidos para todo tipo de explotaciones mineras, pero cuyo desarrollo es necesario reconocer que es francamente difícil para el caso de la explotación de yacimientos minerales, debido a la gran casuística tanto de yacimientos como de métodos de explotación, por lo que no se considera una posibilidad actualmente viable. Si bien existen una serie de recomendaciones, y ciertos criterios más empleados que otros, no son de obligado cumplimiento.

4.2.1. La explotación minera como fuente de impacto ambiental.

La consideración del criterio de realizar el análisis ambiental fijando el punto de estudio sobre el área receptora de impactos, hace necesario el replanteo de la metodología a emplear para el proceso de evaluación de impacto ambiental. Esto se debe a que, si se sigue el proceso de evaluación de impacto ambiental estandarizado, la primera etapa de análisis que habría que realizar sería la identificación de las fuentes de impacto, así como cada uno de los impactos presentes.

En este punto se hace necesaria una reflexión para analizar los factores potencialmente generadores de impacto ambiental. Esto es debido a que, si bien los impactos serían los mismos que se detectarían en una evaluación de impacto ambiental estándar realizada sobre el proyecto de explotación en cuestión, no todos tienen por qué afectar al área sensible objeto de estudio.

Además, debido a la complejidad que puede presentar un proyecto de explotación debido a todas las posibles fuentes de impacto, es habitual segmentar el proyecto a efectos de analizar el ciclo operativo de extracción en operaciones más sencillas. De este modo, la identificación de impactos, a priori, se simplificaría.

Sin embargo el nuevo modelo de análisis presentado establece la hipótesis de que el hecho de segmentar el análisis ambiental de un proyecto como suma de los análisis más sencillos, no simplifica, sino que incluso complica la realización del proceso.

Cabe destacar que la segmentación de un proyecto a efectos ambientales descrita, puede entenderse como que se quiere presentar un proyecto de explotación como suma de varios proyectos independientes con el fin de evitar que sea de aplicación la legislación de evaluación ambiental. Tal y como establece Raff (1997) [121], esto no debe hacerse así para no “ocultar” el verdadero impacto de un proyecto y sus efectos acumulativos. En realidad, solo debería realizarse únicamente a efectos de aplicar el modelo de comparación descrito, siendo complementario a la Evaluación de Impacto Ambiental “clásica”.

Así, con las hipótesis planteadas y, a efectos de aplicación del modelo de comparación presentado como nuevo paradigma de análisis ambiental, se propone que la identificación de fuentes de impacto ambiental sean únicamente las que exceden de los límites de la explotación. De este modo el proyecto de explotación pasa a ser como una unidad indivisible de fuente de generación de impacto, de la que se derivan una serie de afecciones ambientales a analizar y evaluar.

Figura 35: Análisis ambiental clásico (a) y análisis propuesto (b) [59]

Con este planteamiento se simplifica el análisis ya que se evita la evaluación de afecciones que afectan a procesos dentro de la propia explotación. Por ejemplo, si se analizan las operaciones de voladura y se observa que generan unos efectos ambientales tales como proyecciones, vibraciones y onda aérea, no se tendrán en cuenta siempre y cuando no excedan los límites de la explotación. Cabe la posibilidad de que, por ejemplo, las afecciones generadas por las operaciones de voladura afecten a las operaciones de carga y transporte y que, para eliminar este efecto, se tenga que disminuir el tamaño de la voladura a realizar, pudiendo provocar una disminución del ritmo de producción, penalizando la productividad global de la explotación.

Obviamente, estos efectos deberán ser gestionados correctamente, con las técnicas adecuadas [103] y con el fin de preservar la integridad de la explotación, pero a efectos de aplicación del modelo, se cree conveniente que no se tengan en cuenta.

4.3. Establecimiento de Indicadores

El marco metodológico propuesto en esta Tesis Doctoral intenta contribuir a la estandarización de indicadores para establecer cuál es el nivel de impacto ambiental que sufre un punto determinado desde una o varias fuentes de generación de impacto.

Los indicadores tienen dos propiedades que los caracterizan [122]:

- Los indicadores **cuantifican** información, por lo que su información es más evidente.

- Los indicadores **simplifican** información sobre fenómenos complejos para mejorar y facilitar la comunicación del fenómeno a tratar.

Existen estudios respecto a la cuantificación del impacto ambiental de explotaciones mineras [123-125] aunque, tal y como refiere Phillips (2013) [125] estos métodos generalmente no son aplicables al desarrollo de la cuantificación de la sostenibilidad. Existen, en cambio otros autores que realizan contribuciones a dicha cuantificación, como es el caso de los trabajos realizados por Morteza y Mahdi en 2014 [11].

A pesar de la tendencia a emplear de manera generalizada indicadores cuantitativos, en muchas ocasiones estos indicadores se usan enfocándose en el carácter cualitativo que todo indicador cuantitativo posee de manera intrínseca [126].

Desde el punto de vista de la gestión ambiental el establecimiento de indicadores se puede regir por las premisas siguientes:

- Deben ser fáciles de aplicar y de fácil comprensión para los no versados en la materia.
- Deben ser relevantes en el contexto.
- Deben ser científicamente justificables.
- Deben ser cuantitativo.
- Deben ser aceptables en términos de costes.

Por otro lado, desde un punto de vista más científico, se puede señalar que las características que definen a un buen indicador son:

- Facilidad en el manejo.
- La sensibilidad a las pequeñas variaciones del estado ambiental.
- Independencia de los estados de referencia.
- Aplicabilidad en extensas áreas geográficas y en el mayor número posible de comunidades o entornos ecológicos.
- Una posible cuantificación.

No es fácil cumplir con todos estos requisitos a la vez. De hecho, a pesar del amplio abanico de bioindicadores e indicadores ecológicos que se pueden encontrar en la literatura, muy a menudo los indicadores seleccionados son más o menos específicos para unas condiciones dadas o que sólo son aplicables a un determinado tipo de comunidad o ecosistema y/o la escala de observación [127].

Para poder establecer una metodología que sea aplicable a la gran mayoría de las explotaciones mineras y, lo que es más importante, poder comparar dichas explotaciones entre sí, es necesario el establecer unos indicadores que contribuyan a la estandarización de los criterios a emplear en el proceso. Es decir, el siguiente paso en la normalización está

relacionado con la identificación de indicadores apropiados que permitan el seguimiento del rendimiento y comparación de las diferentes opciones [128].

Además, por otro lado, la particularidad que tiene la minería como fuente de impacto al medio ambiente, y que la diferencia de otros sectores productivos, es que se pueden generar impactos tanto positivos como negativos en base al desarrollo sostenible.

Los impactos positivos de la minería se basan en el hecho de que la minería es una industria que provee de bienes y servicios, proporciona oportunidades de empleo directo e indirecto, es una fuente de riqueza para empresas, comunidades y países y la generación de impuestos, derechos y gravámenes es beneficioso para inversores, gobiernos y otras instituciones [13].

Los impactos negativos de la minería se deben en parte también al hecho de que muchos tipos de actividad minera tienen efectos graves y duraderos en el medio ambiente natural y social. Los impactos tienden a ser localmente, y a veces regionalmente, significativos, e incluyen la modificación topográfica, alteración geológica, cambios en las condiciones geomorfológicas e hidrológicas, eliminación de la vegetación, eliminación de la tierra vegetal y los cambios en las condiciones del hábitat de la fauna. Las actividades mineras pueden provocar polvo, ruido, contaminación lumínica, del agua, generar contaminación visual, aumentar el volumen de tráfico, y pueden producir cantidades muy significativas de materiales de desecho, de aguas contaminadas y de emisiones de gases (incluidos gases de efecto invernadero como el CH₄, CO₂, NO_x y SO_x). Además, los impactos de la Minería no distinguen los ámbitos de influencia y pueden tener una afección local, regionales o, incluso, internacional [13].

4.3.1. Indicadores generales

Dentro de que los indicadores pueden ser cualitativos o cuantitativos [126], en función del carácter de los mismos y de los parámetros que tienen en consideración, en los proyectos de actividades extractivas pueden considerarse ciertos indicadores que tienen influencia en varias afecciones ambientales, o bien afectan de manera global al medio ambiente, mientras que otros tienen en cuenta la influencia sobre el medio de afecciones específicas.

4.3.1.1. Tamaño de la operación y ritmo de producción

Desde el punto de vista del impacto ambiental en estudio es razonable postular la hipótesis de la relación que debe existir entre la escala de una operación y la severidad del impacto ambiental asociado [42]. De hecho, parece evidente que la decisión de aumentar la producción en un lugar determinado sólo conduce a un aumento en el impacto ambiental. Comparando altos y bajos índices de producción en dos proyectos, por lo demás idénticos, los siguientes factores tienden a agravar el impacto de la mina más grande:

- Se necesitan mayores plantas fijas e instalaciones.
- Se necesita mayor número o tamaño de equipos móviles.
- La operación a mayor escala produce más residuos.
- En un periodo de tiempo determinado el área afectada en superficie, tanto para minería subterránea como para minería a cielo abierto, es mayor cuanto mayor es la producción.

En la determinación del tamaño del proyecto juega también un papel muy importante la demanda del producto prevista en el Estudio de Mercado. Esta demanda puede tener su origen en una demanda insatisfecha (precios altos o intervenidos) o en una demanda por sustitución (innovación técnica o sustitución de importaciones). Otro condicionante del tamaño del proyecto, es lo que se conoce como unidad mínima de producción rentable, a su vez íntimamente ligada a la tecnología minera utilizada [129].

Sin embargo, desde un punto de vista global, existen diversas teorías, algo simplistas a opinión del autor de esta Tesis, establecidas en Down (1977) [42] a este respecto: el mayor tamaño de la operación puede significar un menor número de explotaciones simultáneas, lo que puede significar un impacto global menor; Ya que los recursos minerales son fijos (no así las reservas) un incremento de la producción significaría una reducción en la vida de la mina, reduciendo así en el tiempo el impacto ambiental; se necesitan áridos para la construcción de instalaciones para usos recreativos, por lo que un mayor ratio de producción significará mayor generación de residuos estériles que pudieran ser usados como áridos, por lo que se podrían construir barreras y apantallamientos de dichas zonas recreativas frente a ciertos impactos ambientales, con materiales disponibles.

Un índice del tamaño de la operación puede establecerse como el ritmo de producción, definido como la cantidad de material extraído en tiempo determinado. Así, es habitual definir el ritmo de la explotación como la relación entre las reservas probadas y la vida de la mina, del siguiente modo:

$$\text{Ritmo} = \frac{\text{Reservas}}{\text{Vida}} = \frac{\text{Tonelaje}}{\text{Año}} \quad (12)$$

El ritmo y la vida son los parámetros que influyen más claramente en un estudio de viabilidad. La definición del ritmo o escala de explotación es “las toneladas de mineral extraídas o producidas por año o por hora de trabajo en algunos casos”.

El ritmo viene marcado fundamentalmente por el mercado, que señala la producción anual susceptible de ser vendida. Evidentemente ciertos factores técnicos condicionan, no sólo unos ritmos mínimos por la capacidad de la maquinaria, sino también el incremento de la producción que no puede ser gradual sino por escalones, especialmente en el proceso de tratamiento del mineral, donde las unidades de machaqueo, molienda y tratamiento tienen unas capacidades críticas más altas y condicionan el ritmo idóneo de explotación de la mina hasta poder obligar a una modularización o ampliación por módulos añadidos y paralelos.

Así, a un mayor ritmo corresponderá:

- Mayor inversión y menor coste.
- Mayor flujo de caja.
- Menor vida

A un menor ritmo corresponderá:

- Menor flujo de caja.
- Mayor vida.
- Menor inversión y mayor coste.

Tal y como se ha definido el Ritmo de la explotación, este parámetro tiene en cuenta tanto la posible duración del impacto ambiental, a través de la inclusión de la vida de la mina, como la posible envergadura del mismo, al incluir las reservas a explotar.

También hubiera sido posible definir el tamaño de la explotación en función de los recursos minerales existentes en un cierto yacimiento, pero se considera que es mejor hablar siempre de reservas en forma de los recursos económicamente explotables, ya que los recursos no caracterizan a un proyecto de explotación, hasta que no se han catalogado como reservas.

4.3.2. Indicadores específicos

4.3.2.1. Paisaje

Los efectos producidos por proyectos mineros sobre el paisaje son difíciles de cuantificar debido a que el impacto visual está íntimamente relacionado con aspectos subjetivos del proyecto o bien no se suele requerir una cuantificación de este aspecto.

Por este motivo, los trabajos realizados por Menegaki y Kaliampakos (2012) [74] establecen unos indicadores que se van a emplear basándose en herramientas de Sistemas de Información Geográfica.

De este modo, para poder comparar de una manera cuantitativa cómo un proyecto influye en las modificaciones al paisaje, tal y como se ha establecido en el Capítulo 3.7.1.1 “Medida de la alteración del relieve topográfico” El parámetro elegido como indicador de la afección en el paisaje es el **índice de geomorfología (LI)**, definido por la siguiente ecuación:

$$LI = \frac{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin}) - 2cov(Z_{orig}, Z_{fin})}{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin})} \quad (13)$$

Donde:

- Z_{orig} =altitudes de la topografía original

- $\text{Var}(Z_{\text{orig}})$ = varianza de la variable Z_{orig}
- Z_{fin} =altitudes de la topografía final (excavada o rehabilitada)
- $\text{Var}(Z_{\text{fin}})$ = varianza de la variable Z_{fin}
- $\text{Cov}(Z_{\text{orig}}, Z_{\text{fin}})$ = covarianza de las variables Z_{orig} y Z_{fin}

Por otro lado, también sería de aplicación, sobre todo por su sencillez, el empleo del parámetro establecido por Azapagic (2000), que tiene en cuenta la superficie ocupada por cada explotación, en el parámetro EI_{land}

$$EI_{\text{land}} = \sum_{l=1}^L B_l \quad (14)$$

Donde B_l , expresado en metros cuadrados, es el área ocupada por la explotación en las diferentes etapas de la mina.

4.3.2.2. Polvo y otras emisiones

De entre los estudios de desarrollados por Chakraborty (2002) [85], y que se han descrito en el Capítulo 3.7.4, donde se establece que la calidad del aire en minería se determina mediante el estudio de diversos parámetros, se han seleccionado los siguientes como indicadores a emplear en la metodología sobre la que versa esta Tesis Doctoral.

- Emisiones debidas a trabajos de perforación.
- Emisiones debidas a los trabajos de carga de estéril.
- Emisiones debidas a pistas de transporte.
- Emisiones debidas a los vertederos de estéril expuestos.
- Emisiones debidas a la superficie de mina expuesta.

Tal y como se ha detallado en la Tabla 7, los parámetros indicados y que servirán como indicadores específicos en esta metodología, se detallan en la Tabla 11, donde se detallan los modelos a los que responden.

Para obtener un ratio de emisión total (E_{total}) se aplicará la tasa de emisión total, como suma de las emisiones parciales, debidas a cada uno de los aspectos considerados

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (15)$$

Tabla 11: Indicadores específicos para los ratios de emisión de polvo [85]

Actividad	Ecuación empírica
Emisiones debidas a trabajos de perforación	$E = 0,0325 \left[\frac{\frac{100-m}{s \cdot u}}{\frac{100-s}{m}} \right]^{0,1} (df)^{0,3}$
Emisiones debidas a los trabajos de carga de estéril	$E = \left[0,018 \left(\frac{100-m}{m} \right) \right]^{0,1} \left(\frac{s}{100-s} \right)^{0,4} (uhxl)^{0,1}$
Emisiones debidas a pistas de transporte	$E = \left(\frac{100-m}{m} \right)^{0,8} \left(\frac{s}{100-s} \right)^{0,1} u^{0,3} (2663 + 0,1 \cdot (v + fc) \cdot 10^{-6})$
Emisiones debidas a los vertederos de estéril expuestos	$E = \left(\frac{100-m}{m} \right)^{0,2} \left(\frac{s}{100-s} \right)^{0,1} \left(\frac{u}{2,6 + 120 \cdot u} \right) \left(\frac{a}{0,2 + 276,5 \cdot a} \right)$
Superficie de mina expuesta	$E = \left(2,4 \frac{100-m}{m} \right)^{0,8} \left(\frac{a \cdot s}{100-s} \right)^{0,1} \left(\frac{u}{4 + 66 \cdot u} \right) \cdot 10^{-4}$
Los parámetros y unidades usadas son: contenido de humedad (%), m; contenido de limo (%), s; velocidad del viento (m/s), u; diámetro de perforación (mm), d; frecuencia (nº barrenos/día), f; altura de caída (m), h; tamaño de la cargadora (m³), l; velocidad media de los vehículos (m/s), v; capacidad de los volquetes (t), c; área (km²), a; frecuencia de carga (nº/h), x.	

4.3.2.3. Ruido

Tal y como se ha descrito en el capítulo 3.7, el ruido es un fenómeno difícil de estudiar debido a que intervienen un gran número de parámetros.

Para limitar el estudio y establecer un criterio objetivo de comparación se establecerá el nivel de propagación del sonido en el aire según la Norma ISO 9613-2 [130]. Para ello, se seleccionará la fuente de emisión de mayor intensidad, o bien la que sea más susceptible de generar ruido, y el punto objetivo a proteger.

Se deberá establecer la intensidad de la fuente (en dB), la frecuencia asociada (en Hz), la distancia entre fuente y receptor, la altura de las posibles barreras, y distancia entre fuente, receptor y barrera y tipo de terreno, así como se establecerá la atenuación debida a la temperatura y al tipo de terreno.

Con estos parámetros y el procedimiento de medida, establecido en la Norma ISO 9613-2, descrita, como se ha comentado en el capítulo 3.7.6, se definirá un nivel de sonido en el punto receptor medido en dB.

Estos valores podrán establecerse a partir de datos medidos directamente en campo o mediante los valores de referencia establecidos en el mismo capítulo.

4.3.2.4. Efectos de voladuras

Tal y como se ha descrito en el Capítulo 3.7.7, los efectos medioambientales de las voladuras pueden producirse en forma de vibraciones, proyecciones y onda aérea. Además estos efectos se producen exclusivamente cuando tienen lugar las voladuras, por lo que el número de voladuras y el tamaño de las mismas tienen influencia en la cuantificación de indicadores.

No es sencillo establecer un parámetro que refleje y cuantifique los efectos ambientales de las voladura ya que en gran parte, los efectos producidos por las voladuras vienen condicionados por unos parámetros de diseño de modo que una misma voladura puede producir mayores o menores afecciones al medio ambiente en función de la secuenciación de los barrenos, por ejemplo.

Sin embargo, desde el punto de vista del alcance de esta Tesis Doctoral, se están desarrollando y estableciendo indicadores que sirvan de comparación entre diferentes explotaciones mineras. Además, debería ser posible que este indicador fuera estimable antes del comienzo de la explotación, para poder prever en fases tempranas del desarrollo del proyecto el alcance de las afecciones ambientales al entorno. De este modo se busca establecer el nivel de impacto ambiental potencial ocasionado por la acciones de las operaciones de perforación y voladura.

Así, los parámetros fundamentales que se van a emplear para el establecimiento del indicador son:

- N: Número de voladuras por unidad de tiempo (día, semana, mes, año,...)
- t: toneladas de explosivo por voladura tipo.
- d: distancia al núcleo de población (o zona sensible) más cercano.

El parámetro establecido será E_{vol} , se define como:

$$E_{vol} = \frac{N \cdot t}{d^{1,6}} \cdot K \quad (16)$$

El numerador del parámetro E_{vol} , $N \cdot t$ se corresponde con las toneladas de explosivo consumido por unidad de tiempo.

Este parámetro sería fácilmente obtenido porque la cantidad de explosivo a emplear se debe conocer con antelación, bien por motivos de planificación, bien por motivos regulatorios.

El denominador se establece en base a que cuanto mayor es la distancia de la explotación a zonas sensibles (habitadas, protegidas, etc.) menor serían las afecciones debidas a las

voladuras, por tanto responde a la atenuación que sufren las vibraciones con la distancia. Esta atenuación no es lineal, puesto que las ondas tienden a disiparse en el terreno de forma exponencial, y se ha establecido la razón de dicha atenuación en función del valor medio de la atenuación de las vibraciones en diferentes tipos de terrenos establecido en base a las referencias [100, 131-133].

El factor “K” es un factor introducido para poder generalizar el indicador tanto a explotaciones de superficie como subterráneas, ya que las afecciones por las voladuras son totalmente diferentes en un caso y en otro. Si suponemos que los componentes de las afecciones por voladura son, como se ha descrito anteriormente vibraciones, proyecciones y onda aérea, en explotaciones subterráneas no existen afecciones por proyecciones ni por onda aérea.

De este modo se ha establecido, a efectos de comparar el potencial impacto ambiental, los valores del factor “K” los valores siguientes:

- Explotaciones de superficie: $K=1$
- Explotaciones subterráneas: $K=0,33$

4.3.2.5. Subsistencia

La subsidencia es un impacto que afecta exclusivamente a las explotaciones mineras de interior. Existen metodologías para poder predecir los efectos de una potencial subsidencia así como métodos cuantitativos de predicción [134], pero todos ellos dependen de parámetros muy específicos que hacen que no sean de aplicación general [76, 79, 80]. En cambio, sí que existen correlaciones para predecir de manera cualitativa la subsidencia en función del método de explotación, por lo que en el alcance de esta Tesis se va a establecer una valoración numérica en función del método de explotación. En la Tabla 5 se establecen los valores indicados en la Tabla 12.

Tabla 12: Valoración del efecto por subsidencia [81]

Método	Consideraciones sobre la subsidencia	Valoración “k” (0-5)
Métodos a Cielo abierto	Sin posibilidad de subsidencia	0
Cámaras y Pilares	Posibilidad de subsidencia	1
Cámaras por subniveles	Relleno para evitar la subsidencia	3
Corte y Relleno	Relleno para evitar la subsidencia	3
Tajo Largo	Posibilidad de subsidencia	1
Hundimiento por subniveles	Severos efectos por subsidencia	5
Hundimiento por bloques	Severos efectos por subsidencia	5

El efecto por subsidencia (E_{subs}) estaría compuesto por varios componentes:

- Efecto debido al método de explotación (Tabla 12)
- Efecto debido a la profundidad.
- Efecto debido a la altura de la excavación

Desde un punto de vista simplificado y objetivo, en la línea de los objetivos y el alcance de esta Tesis Doctoral, se considera que cuanto mayor es la profundidad (d), menor es la subsidencia. En cuanto a la altura de la excavación (h), cuanto mayor es la altura de la excavación, mayor es la subsidencia [75]. Con estas consideraciones se tendría la relación (17):

$$E_{subs} = k \cdot \frac{h}{d} \quad (17)$$

Se considera que este efecto sería el debido a la excavación de un nivel de mineral. Para generalizar el efecto debido a una explotación multinivel, se obtendría el efecto acumulado para cada una de ellas. Así se tendría la relación (18) para “ n ” niveles de explotación:

$$E_{subs} = k \cdot \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{d_i} \quad (18)$$

Donde h_i sería la altura de la excavación de cada nivel, d_i la profundidad de cada nivel, ambos considerados en las mismas unidades, para obtener una relación adimensional, del efecto por subsidencia.

4.3.2.6. Residuos

En el caso de la generación de residuos se emplea el criterio ya empleado en otros estudios en el mismo campo de aplicación, como por ejemplo Azapagic (2000) [128], donde se establece el parámetro SW (Solid Waste) como

$$SW = \sum_i B_i \quad (19)$$

Donde B_i , expresado en kilogramos, es la cantidad de residuos sólidos generada por unidad de tiempo.

El potencial efecto máximo debido a la generación de residuos será aquel que se corresponda con el máximo volumen de balsas de residuos y/o escombreras admitido o autorizado en proyecto.

4.3.2.7. Afección a los cursos del agua y drenaje ácido de mina

La principal fuente de contaminación del agua es el drenaje de aguas ácidas de mina [135]. Las aguas ácidas se generan en aquellas operaciones mineras donde los sulfuros metálicos minerales son oxidados. Los sulfuros metálicos están presentes en los macizos rocosos asociados a la mayor parte de la minería metálica. La oxidación de estos materiales puede producirse antes de la actividad minera por procesos de meteorización [136]. Puesto que la mayoría de los metales se encuentran en forma de sulfuros, la separación de la ganga de la mena crea enormes cantidades de roca estéril, los cuáles, si se lavan con aguas de lluvia, deshielo, etc. pueden crear el efecto del drenaje de aguas ácidas de mina [135].

De este modo el desarrollo de indicadores para el establecimiento de un marco comparativo tendrá como parámetro fundamental la composición de la roca y los minerales presentes.

Según Skousen et.al. [137] el drenaje ácido de roca puede clasificarse en diversos tipos:

- Tipo 1. Sería el drenaje que tiene poca o nula alcalinidad ($\text{pH} < 4.5$) y contiene altas concentraciones de Fe, Al, Mn y otros metales, acidez y oxígeno.
- Tipo 2. El drenaje de mina tiene un alto contenido total de sólidos disueltos que contienen alto contenido de hierro ferroso y Mn, sin o con bajo contenido de oxígeno y $\text{pH} > 6.0$. Tras la oxidación, el pH de esta agua se reduce drásticamente y se convierte en tipo 1.
- Tipo 3. Este drenaje de mina tiene de moderada a alta concentración total de sólidos disueltos, bajas a moderadas cantidad de hierro ferroso y Mn, sin contenido de oxígeno o con bajo contenido de oxígeno, $\text{pH} > 6.0$ y alcalinidad superior a la acidez (comúnmente llamado drenaje alcalino de la mina). Después de la oxidación, el ácido generado a partir de la hidrólisis de metal y las reacciones de precipitación se neutralizan por la alcalinidad ya presente en el agua.
- Tipo 4. En este caso el drenaje de mina se neutraliza con $\text{pH} > 6.0$ y alto contenido de partículas totales. Aún no se ha producido la sedimentación de los hidróxidos de metales en el agua. Con el tiempo de residencia en una balsa, las partículas se asentarán y la formarán agua de drenaje de tipo 5.
- Tipo 5. El drenaje de mina se neutraliza, con $\text{pH} > 6.0$ y presentan alto contenido de sólidos totales disueltos. Después de que la mayoría de los hidróxidos de metales han precipitado en una balsa de sedimentación, los principales cationes se marcharon en altas concentraciones en el agua por lo general disueltos en Ca y Mg. Si la alcalinidad o el oxígeno falta en los proceso de neutralización, el agua de drenaje no alcanzará Tipo 5.

De este modo puede implementarse el indicador relativo a las potenciales afecciones del drenaje ácido de mina de acuerdo al tipo de efluentes generados en el proceso.

4.3.2.8. Consumo de energía

El establecimiento de un indicador relativo al consumo de energía hace posible obtener datos que indiquen qué explotación minera contribuye más a la generación de gases de efecto invernadero, bien directa o indirectamente, así como al consumo energético directamente.

El consumo de energía es un parámetro que está directamente relacionado con el ritmo de producción. Esto significa que el ratio de extracción de material por año, bien sea mineral o estéril, implicará un consumo energético determinado. Cuanto mayor sea la cantidad de material a extraer, mayor será la cantidad de energía necesaria en el proceso. Del mismo modo, la energía necesaria para el procesamiento del mineral es tanto mayor cuanto mayor es la cantidad de material a procesar.

En este escenario, los parámetros a buscar deben estar íntimamente relacionados con los tonelajes de material a mover. De este modo se creen de especial utilidad las investigaciones realizadas por Norgate y Haque (2010) [86], que han sido descritas en el apartado 3.7.5, donde se recogen datos de consumo de energía para cada una de las actividades que componen las operaciones mineras, tales como perforación, voladura, carga y transporte, molienda, desagüe, entre otros. Si bien estos datos han sido calculados a partir de datos e informaciones procedentes de la minería del hierro y de la bauxita en explotaciones mineras a cielo abierto y en explotaciones subterráneas de cobre, pueden servir como referencia para comparar operaciones entre sí, de acuerdo al enfoque de la presente Tesis Doctoral.

4.4. Modelos dinámicos de impacto ambiental

Los efectos ambientales de una actividad minera cualquiera que sea su tipo, tienden a aumentar tanto en el ámbito geográfico como en intensidad según sea el grado de avance de las distintas fases en que se puede subdividir un proyecto (prospección y exploración minera, ingeniería básica y de detalle, construcción y puesta en marcha, extracción y procesamiento y, finalmente, cierre y restauración), pero su importancia relativa varía de un lugar a otro. Las acciones a tomar sobre la mayoría de las cuestiones ambientales se tomarán por entidades empresariales concretas, de conformidad con la política de la empresa y las normas y reglamentos ambientales nacionales. Las asociaciones mineras a menudo guían las acciones sobre el medio ambiente a través de buenas prácticas empresariales, el desarrollo de las mejores técnicas disponibles, y la organización de programas de información y formación [15] entre otros.

El impacto ambiental de un proyecto de explotación tiene un carácter que es variable a lo largo del tiempo ya que, desde su concepción, establece una secuencia de fases diferentes en las que su finalidad concreta, las actividades y los trabajos que se desarrollan en cada una, son de naturaleza diferente. Al aplicar las técnicas habituales de evaluación de impacto ambiental, se establece que se definan las fuentes de impacto y en una gran parte de las técnicas se establece que se definan los aspectos más adversos que pueden darse, es decir, que se realice la evaluación del peor escenario posible. Si esto se realiza así para el caso de proyectos de explotación minera, donde la mina evoluciona en gran medida y a lo largo del tiempo durante un muy largo plazo, se podría dar la situación de que se tomen medidas para una situación determinada pero totalmente extemporánea con el desarrollo del proyecto.

Sin embargo, estas medidas se toman una vez que el proyecto está en ejecución, con la explotación minera en progreso y su evaluación previa tiene mayor dificultad. Además, en el caso de la evaluación ambiental de dos proyectos que coexisten en el espacio y en el tiempo, esta evaluación es difícilmente comparable.

La explotación de los recursos minerales, una vez que se ha finalizado la fase de explotación que ha demostrado la presencia de mineral, suele llevar asociada la consecución de cinco fases [72]:

- 1 Preparación de la actividad.
- 2 Desarrollo de las infraestructuras necesarias.
- 3 Apogeo. Punto álgido de la explotación.
- 4 Disminución de actividad.
- 5 Agotamiento de los recursos.

Para la modelización cuantitativa de los impactos, se ha basado en el desarrollo cualitativo del fenómeno asociado a cada nivel de impacto ambiental, estableciendo una distribución de nivel de impacto en función del tiempo. Existen estudios previos a este respecto, como el modelo

cualitativo desarrollado en 2011 por Zhang, et al. [72] desarrollado para la analizar la evolución del paisaje en función de las diferentes etapas de la explotación (Figura 36).

Figura 36: Modelo cualitativo de cambios en el paisaje en función de la fase del proyecto minero [72]

Para analizar los diferentes impactos para diferentes explotaciones en un mismo marco de comparación es necesario adaptar la duración de cada una de las fases del proyecto, ya que la secuencia operativa es propia de cada explotación, dependiendo del cantidad y calidad del mineral a extraer, método de excavación, forma del yacimiento, contenido mineral, entre otros factores que definen las técnicas a emplear en cada caso.

De esta manera con las bases establecidas por Zhang, et al. (2011) [72] y por el “International Council on Mining and Metals (ICMM)” en 2012 [2] se ha establecido una distribución cualitativa del nivel de impacto en función del nivel de actividad del proyecto para cada uno de los impactos considerados. La distribución cualitativa establecida se recoge en la Tabla 13. Es necesario destacar que la escala considerada en esta distribución se basa en la idea de que el impacto se considera un valor de “1” cuando cada impacto alcanza su valor máximo y un valor de “0” cuando no hay impacto aparente.

Tabla 13: Distribución cualitativa de impacto en función del nivel de actividad

Etapa	Impacto Coyuntural	Impacto Estructural				
		Paisaje	Residuos	Cursos del agua	Drenaje	Subsidencia
Preparación de la actividad	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Desarrollo de las infraestructuras	0,2	0,3	0,2	0,2	0,8	0,5
Apogeo	1	1	0,5	1	1	0,8
Disminución de actividad	0	0,5	1	0,9	0,9	1
Agotamiento de los recursos	0	0,3	1	0,5	0,8	0,8

Los modelos desarrollados se representan de forma gráfica en diagramas X-Y, donde el eje X representa la vida del proyecto, expresada en años, y en el eje Y se representa el nivel de impacto ambiental, en escala de 0 a 1. Estas escalas se mantienen para todos y cada uno de los impactos analizados para expresar los datos de manera normalizada. De este modo, a través del establecimiento de conjuntos de factores de ponderación se podrá establecer el marco comparativo buscado.

En los gráficos, se distinguen diversas áreas, que se corresponden con las etapas de la explotación:

- OA: Representa el comienzo y preparación de la actividad de extracción.
- AB: Representa el desarrollo de las infraestructuras necesarias para la explotación.
- BC: Representa la etapa de apogeo, es decir de máxima actividad de la explotación.
- CD: Representa la etapa de disminución de actividad.
- DE: Representa la etapa de agotamiento de los recursos y preparación para el cese de la actividad.

Además, se muestran puntos más allá del cierre de la explotación para representar aquellos impactos que permanecen todavía activos una vez cesada la explotación.

Con estas hipótesis, se genera el concepto de **modelo dinámico de impacto ambiental** en explotaciones mineras.

En este punto es necesario establecer diferencias en los tipos de impactos, en función del carácter que tiene su distribución en el tiempo. Si bien todos los impactos tienen su origen en el propio proyecto, se pueden distinguir dos grupos, en función de su relación con el desarrollo o no del proyecto.

De modo previo al desarrollo de la modelización de cada uno de los impactos se establecen los siguientes grupos de impactos ambientales:

Impactos Coyunturales (o circunstanciales): serán aquellos que dependen directamente de la actividad de la mina, pero, si cesa la actividad en un momento dado, el impacto ambiental cesa. Por tanto son impactos temporales.

Impactos Estructurales: serán aquellos que, si bien dependen directamente de la actividad del proyecto, si cesa la actividad, el impacto ambiental permanece en el tiempo. Pueden ser impactos permanentes o temporales, aunque en caso de ser temporales, su duración es a más largo plazo que los impactos coyunturales.

4.4.1. Modelo dinámico de impacto ambiental estructural

Los impactos que se engloban en esta categoría que se han considerado dentro del ámbito de la presente Tesis Doctoral, son los efectos sobre el paisaje, impactos debidos a la subsidencia, afección sobre el curso de las aguas, generación de residuos y drenaje de aguas ácidas de mina.

En caso de que haya un cese puntual de la actividad, debido a cualquier causa (precio del mineral, problemas financieros, etc.) los efectos descritos bajo este epígrafe continuarán en mayor o menor medida, por lo que responden a comportamientos de los modelos completamente diferentes.

4.4.1.1. Paisaje

El impacto sobre el paisaje está directamente relacionado con el nivel de actividad de la explotación, comenzando con un bajo nivel de impacto que evoluciona rápidamente con la construcción de las infraestructuras necesarias para su explotación y que alcanza su nivel máximo en el apogeo de la mina, descendiendo a medida que disminuye la actividad, por agotamiento de recursos y que junto con las preceptivas tareas de restauración, culmina alcanzando un nivel de impacto remanente que determinará la situación final una vez terminado el proyecto.

Cabe destacar que se saldrían del alcance de la aplicación de este modelo aquellos proyectos que no cumplan con las preceptivas tareas de restauración que conlleven una recuperación del espacio afectado por las actividades mineras, bien volviendo el área a su estado original, o, lo que es más habitual, recuperando el área afectada y devolviéndolo a la sociedad para el uso al que estaba destinado u otro diferente.

Este modelo de impacto sobre el paisaje responde a la distribución mostrada en la Figura 37:

Figura 37: Modelo dinámico de impacto ambiental sobre el paisaje

4.4.1.2. Subsistencia

Este efecto se genera exclusivamente en el caso de explotaciones subterráneas. La subsistencia se comienza a generar después del comienzo del desarrollo de la actividad debido a que responde a los asentamientos en el terreno generados por la redistribución de tensiones en el macizo rocoso. Es por tanto, consecuencia de la excavación. Una vez generado el hueco resultante de la extracción de mineral o construcción del desarrollo de mina, comienza a asentarse el terreno. El efecto producido por la subsistencia generaría un primer pico de asiento después de la excavación y este efecto se mantiene en niveles altos que van disminuyendo a menor nivel a lo largo de la duración del proyecto. Así, una vez finalizado el proyecto la posibilidad de asentamientos en superficie permanece aunque el nivel desciende con el tiempo, al poder producirse asentamientos hasta que la distribución de tensiones en el terreno se pueda considerar definitiva.

El modelo dinámico de impacto de la subsistencia responde a la distribución de la Figura 38:

Figura 38: Modelo dinámico de impacto ambiental de la subsidencia

4.4.1.3. Afección sobre el curso de las aguas

La desviación de los cursos de agua superficiales y las posibles afecciones a los acuíferos subterráneos tiene lugar ya desde el mismo comienzo de la fase de desarrollo del proyecto por el desvío de los cauces superficiales que crucen el emplazamiento. El progreso de la excavación genera progresivamente variaciones en el nivel freático derivadas de las necesidades de la explotación, con el fin de que ésta se realice en condiciones seguras. Estas variaciones disminuirán con la finalización del proyecto, y deberían volver a sus cauces y niveles freáticos originales a la finalización del proyecto. Si bien esta afección ambiental puede causar desviaciones permanentes en los cauces, los trabajos de restauración pueden dar lugar a nuevos ecosistemas a partir de los nuevos cauces generados. A efectos del alcance de esta Tesis Doctoral, se considera el carácter global de las afecciones de los cursos de las aguas, incluyendo el estado resultante, razón por la que la distribución cualitativa desarrollada considera que el potencial impacto ambiental disminuye a medida que se clausura el proyecto.

Este impacto responde a la distribución mostrada en la Figura 39:

Figura 39: Modelo dinámico de impacto de la desviación de los cursos de agua

4.4.1.4. Residuos

A efectos del ámbito de aplicación de la metodología desarrollada en esta Tesis Doctoral se entiende la generación de residuos como la generación de material estéril que se deposita en escombreras. El impacto ambiental considerado por la generación de residuos que se tiene en cuenta es el impacto global en que pudiera producir. Este impacto global será diferente en cada explotación, dependiendo del destino de los residuos generados y el tipo de gestión a la que van destinados. Así, puede haber explotaciones que depositan sus residuos directamente en escombreras, otras explotaciones de menor tamaño pueden gestionar sus residuos a través de empresas externas, o incluso, el residuo generado en una explotación puede ser el material valorizable (reutilizado o reciclado) en la propia explotación o en centros de valorización externos. Por estos motivos, y para aplicar el carácter generalista que se está aplicando a los indicadores desarrollados en esta Tesis Doctoral, se considera el global de material considerado residuo de la explotación, como la fuente de impacto sobre el medio.

De este modo, el nivel de impacto causado por la generación de residuos, se generará después del comienzo del proyecto y con un ritmo más lento, debido a que es consecuencia del desarrollo de mina. Alcanzará su nivel máximo al final de la etapa de explotación de la mina y las escombreras se mantendrán en el tiempo, en aquellos casos en los que el residuo se deposite en escombreras. Pudiera haber alguna disminución posterior del efecto debida al uso de materiales de escombrera en tareas de restauración, pero generalmente, ese hecho será mínimo comparado con las escombreras existentes.

Este modelo dinámico de nivel de impacto ambiental debido a la generación de residuos responde a la distribución mostrada en la Figura 40:

Figura 40: Modelo dinámico de impacto ambiental de la generación de residuos

4.4.1.5. Drenaje de aguas ácidas de mina

Entendiendo por drenaje al efecto resultante causado por el efluente generado por la acidificación o lixiviación de los diversos cursos de agua existentes en cada explotación así como por las aguas residuales de procesamiento del mineral, el impacto ambiental generado se produciría solo en aquellas explotaciones susceptibles de generación de aguas ácidas, bien por el material de excavación, bien por el procesamiento realizado al mismo.

Igual que ocurre con otros parámetros, el potencial nivel de impacto por el drenaje se genera como consecuencia de la propia explotación. Este puede ser bien por el drenaje de las aguas a través de la propia excavación, bien, por el drenaje producido por la lixiviación de pilas y escombreras y su filtración al subsuelo. Por este motivo el comportamiento del impacto se asemeja al de la subsidencia, por ser una consecuencia de la excavación junto con el comportamiento del impacto de la generación de residuos, al crecer el efecto como consecuencia del aumento de los residuos generados.

Existen casos en los que el drenaje ácido se puede producir años después de la explotación de la mina, pero a efectos de evaluar el potencial impacto ambiental ocasionado por la existencia de las condiciones adecuadas para una generación de aguas ácidas, se considera la hipótesis de que el potencial impacto es consecuencia de la excavación.

El modelo dinámico de nivel de impacto ambiental debido al drenaje respondería a la distribución mostrada en la Figura 41:

Figura 41: Modelo dinámico de impacto ambiental del drenaje ácido

4.4.2. Modelo dinámico de impacto ambiental coyuntural

Los impactos ambientales coyunturales son aquellos que están relacionados directamente con la operación minera y que cesan cuando cesa la actividad. Dentro de estos impactos se pueden englobar los siguientes impactos:

- Afecciones por ruido.
- Polvo.
- Efectos de las voladuras (vibraciones, proyecciones y onda aérea).
- Consumo de energía y emisiones de CO₂.
- Otros

Todos ellos comienzan de modo progresivo y a medida que aumenta la actividad de la explotación. Alcanzan su nivel máximo durante la etapa de la explotación de la mina. Una vez que comienza el agotamiento del yacimiento comienza una etapa de declive en la que disminuye tanto la actividad como la afección ambiental asociada hasta eliminarse por completo. El proyecto progresa con las fases de desmantelamiento y cierre, donde las afecciones coyunturales, tal y como se han definido, tienen un valor cero.

La distribución del modelo cualitativo que siguen los impactos coyunturales es el expresado en la Figura 42:

Figura 42: Modelo dinámico de impactos ambientales coyunturales

4.5. Factores de ponderación y nivel de impacto global

El establecimiento de indicadores se ha realizado tomando como premisa la determinación de parámetros objetivos que sean de aplicación para el mayor número de métodos de explotación posibles. Esto implica que sea necesaria una interpretación cuidadosa de los resultados para no dar lugar a circunstancias anómalas que no respondan al comportamiento real de una explotación.

Para minimizar este efecto, es posible establecer unos niveles de ponderación para corregir posibles desequilibrios entre los impactos ambientales considerados.

El modelo de impacto en un punto determinado debido a las actividades mineras, fuera de la explotación, potencial fuente de generación de impacto sería la suma total de los efectos individuales, expresado en la ecuación (20):

$$EIA = \sum_i f_i(t) \quad (20)$$

Donde $f_i(t)$ representa la modelización de cada impacto ambiental.

Una vez que se han establecido cada uno de los diferentes modelos es posible hacer una estimación cuantitativa de la evaluación de impacto ambiental global. El primer paso para llevarlo a cabo, de acuerdo al procedimiento mostrado en la Figura 43, sería el establecer una

ponderación de cada uno de los impactos ambientales generados que puedan causar daños en el entorno.

Figura 43: Secuencia para la modelización cuantitativa de impactos ambientales

De acuerdo a este modelo, el impacto total debería ser el expresado en la ecuación (21)

$$EIA = \sum_i K_i \cdot f_i(t) \quad (21)$$

Donde K_i representa el conjunto de factores de ponderación considerados para cada uno de los impactos ambientales estudiados.

Del mismo modo, si existen “n” explotaciones mineras siendo potenciales fuentes de impacto sobre el área sensible establecida, el efecto global debería cumplir con el modelo expresado en la ecuación (22).

$$EIA_{global} = \sum_n EIA_n \quad (22)$$

Una vez llegado a este punto, la metodología requiere establecer criterios de ponderación para cada impacto ambiental. Existen múltiples estudios al respecto, donde se ha llevado a cabo la ponderación objetiva de criterios, entre los que destacan, entre otros, los trabajos de Folchi (2003) [123], Monjezi et al. (2009) [124], Namin et al. (2011) [138] y Phillips (2013) [125].

Cabe destacar que Monjezi et al. (2009), Namin et al. (2011) y Phillips (2013) se basan en el desarrollo y evolución de los trabajos de Folchi (2003), pero tal y como establece Phillips (2013), no siempre se han empleado correctamente los trabajos de Folchi (2003), ya que al

aplicar estos métodos al marco del desarrollo sostenible, solo se tienen en cuenta los impactos ambientales negativos [125].

En cambio, los criterios de valoración de la ponderación pueden ser aplicados en el modelo dinámico de impacto (Tabla 14)

Tabla 14 : Magnitudes para diversos factores de impacto (Adaptado de [125])

Impacto		Escenario	Magnitud (K _i)
Estructural	Paisaje	Puede ser visto desde áreas habitadas	6–10
		Puede ser visto desde carreteras principales	2–6
		No es visible	1–2
	Subsidencia	Daños estéticos, por encima del límite establecido	7–10
		Umbral de tolerancia	3–7
		Valores por debajo del umbral de tolerancia	1–3
	Aguas superficiales	Interferencia con lagos y ríos	6–10
		Interferencia con sistemas hídricos no relevantes	3–6
		Sin interferencia	1–3
Coyuntural	Aguas subterráneas	Nivel freático superficial y terrenos permeables	5–10
		Nivel freático profundo y terrenos permeables	2–5
		Nivel freático profundo y terrenos no permeables	1–2
	Drenaje ácido de mina (AMD)	El residuo es probable causa de AMD (superficial o subterráneo)	5–10
		El residuo es probable causa de AMD superficial	2–5
		El residuo no es probable causa de AMD	1–2
	Residuos	Residuo ácido	5–10
		Residuo tanto ácido como inerte	2–5
		Residuo inerte	1–2
	Emisiones y polvo	Emisiones libres a la atmósfera	7–10
		Emisiones en torno al valor de referencia	2–7
		Emisiones por debajo del valor de referencia	1–2
	Proyecciones	No existe diseño de voladura ni procedimientos de trabajo	9–10
		Existe diseño de voladura pero no procedimientos de trabajo	4–9
		Existen tanto diseño de voladura como procedimientos de trabajo	1–4
	Vibraciones terrestres	Daños estéticos por encima del valor límite	7–10
		Valores en torno al límite de tolerancia	3–7
		Valores por debajo del límite de tolerancia	1–3
	Ruido	Sobrepresión a 1 km de distancia:	
		<141 dB	8–10
		<131 dB	4–8
		<121 dB	1–4

Por tanto, estos factores serán los considerados en la presente Tesis Doctoral a efectos de aplicar una ponderación que establezca mayor importancia relativa a unos impactos respecto a otros.

4.6. Influencia de los indicadores en la planificación minera

La evolución de la Evaluación de Impacto Ambiental descrita en la metodología puede ser aplicada para analizar las diferentes interacciones que pueden tener lugar entre diferentes operaciones mineras que coexisten en una misma región. Normalmente los yacimientos minerales son lo suficientemente grandes como para ser explotados desde diferentes minas y todos ellos tendrán mayor o menor influencia en las afecciones ambientales producidas en zonas adyacentes [60].

En una escala regional, donde diferentes minas y otros proyectos asociados son desarrollados muy cerca unos de otros, la evolución de los efectos ambientales puede ayudar a detectar si ciertas situaciones son tolerables o no. Esto significa que la coexistencia de diversas afecciones ambientales puede exceder los umbrales de tolerancia y convertirse en insostenible. Sin embargo, el impacto global puede modificarse con el aplazamiento de uno de los proyectos de modo que el efecto acumulativo de ambos sea menor. Este hecho debe ser estudiado para evaluar la compatibilidad o prevalencia de cada uno de los proyectos, debido a que si uno de los proyectos se retrasa puede significar una pérdida de oportunidad de negocio, bien en forma de coste de oportunidad, bien en forma de reducción de beneficios, haciendo el proyecto menos rentable [139]. La Figura 44 muestra diferentes resultados dependiendo del momento en que cada proyecto comienza. Es de destacar si ambos proyectos empiezan al mismo tiempo (Figura 44a), el efecto ambiental efectivo es mucho mayor que si uno de los proyectos es retrasado en el tiempo (Figura 44b). Esta situación será admisible con la hipótesis de que los efectos ambientales de ambos proyectos sean los mismos [59].

Figura 44: Nivel del impacto ambiental vs. Tiempo.
 Dos proyectos empezando juntos (Figura 44a) y dos proyectos con comienzo desfasado (Figura 44b).

5. RESULTADOS

Dentro de los objetivos de esta Tesis Doctoral se encuentra la determinación del impacto ambiental producido por explotaciones mineras en un área determinada, mediante el uso de la metodología desarrollada en capítulos anteriores. Como premisa básica de la metodología desarrollada se ha buscado el empleo de modelos bien empíricos, bien teóricos, que puedan emplearse para múltiples tipo de explotaciones y que sean aplicables para establecer una comparación de explotaciones y determinar así qué proyecto minero genera menor impacto.

Por otro lado, se ha analizado el carácter dinámico de los impactos ambientales para establecer así el nivel de impacto en función de cada una de las fases del proyecto minero.

5.1. Aplicación al caso de estudio

Para ilustrar el empleo de esta metodología se ha realizado la aplicación del procedimiento desarrollado a un caso real donde coexistan explotaciones para poder así determinar el nivel de impacto ambiental en un área determinada.

Figura 45: Ubicación del caso de estudio. [140]

La finalidad de la aplicación de la metodología a un caso práctico es la de mostrar el modo de hacer frente a las dificultades que se presentan e ilustrar el alcance de la misma. Esto significa que, en algunos casos, se han realizado hipótesis relativas a los procesos de explotación estudiados que se detallan en cada momento.

El caso de estudio se ubica en el Término Municipal de Gerena, al noroeste de la provincia de Sevilla (Figura 45). Al Sureste del centro urbano, en torno a 4 km del centro urbano de Gerena, se encuentra una mina de cobre a cielo abierto (en adelante denominada “Mina”), junto con la infraestructura asociada para el acopio de mineral y el depósito del material estéril, así como las instalaciones de procesamiento de mineral. Además, en el mismo municipio se encuentra una cantera de áridos (en adelante denominada “Cantera”), a una distancia de unos 500 m y situada al Noreste del centro urbano. La disposición de ambas explotaciones se muestra en la Figura 46.

En este escenario se va a aplicar la metodología desarrollada para mostrar la implicación que tienen ambas explotaciones en el impacto ambiental que sufre el núcleo urbano en función de cada una de las fuentes de impacto desarrolladas.

Figura 46: Detalle de la ubicación del caso de estudio. [140]

Para poder llevar a cabo la aplicación de la metodología al desarrollo de un caso práctico se han empleado herramientas basadas en sistemas de información geográfica (SIG), utilizando el software “QGIS 2.2 Valmiera”.

5.1.1. Determinación de la zona sensible

Tal y como se ha descrito en la metodología, el primer paso para comenzar el desarrollo del análisis de impacto ambiental sería el determinar la zona sensible frente a los impactos generados en el área.

A la vista de la zona de estudio, se ha considerado que la zona sensible sería la correspondiente al casco urbano del municipio de Gerena y, dentro del mismo, se ha buscado un punto afectado por las dos fuentes de impacto consideradas. Este punto estaría situado en las coordenadas esféricas -6.14111, 37.53367, que se corresponden con las coordenadas UTM X=752611.216 e Y=4157918.564. La ubicación del citado punto se muestra en la Figura 47.

Este punto se considera como el lugar donde existen viviendas y que está más expuesto a las dos explotaciones mineras objeto de estudio.

Figura 47: Detalle de la ubicación del punto objetivo. [140]

Las distancias desde el punto objetivo a cada una de las fuentes de impacto son las siguientes:

- Distancia punto objetivo-punto Cantera: 880 metros
- Distancia punto objetivo-punto Mina: 4340 metros

La distancia desde el punto objetivo a la cantera se corresponde con la distancia desde el punto objetivo hasta los bancos en explotación. En el caso de la distancia desde el punto objetivo a la Mina, se corresponde con el punto más cercano de la explotación.

Durante el desarrollo del análisis de cada uno de los impactos generados, las distancias se deberán adecuar a la zona de generación, es decir, la afección debida a las pistas de transporte puede estar a una distancia diferente de la afección debida a las operaciones de perforación de la explotación. Esto es debido a las dimensiones de las explotaciones que hacen que los puntos de generación de dichos impactos tengan gran influencia en las distancias a considerar. Así, las dimensiones de un proyecto de explotación pueden estar en torno a varios kilómetros de extensión (llegando en ciertos casos a decenas de kilómetros) mientras que las distancias a puntos sensibles desde ciertas áreas de la mina, suelen estar a distancias del orden de centenares de metros.

5.1.2. Indicadores generales

De acuerdo a lo establecido en el capítulo 4.3.1, es razonable postular la hipótesis de la relación que debe existir entre la escala de una operación y la severidad del impacto ambiental asociado. En dicho capítulo se ha establecido que un parámetro determinante en el nivel de impacto ambiental generado es el tamaño de la operación y éste ha sido valorado de tal forma que un parámetro indicativo de su envergadura es el ritmo de producción anual, medido en toneladas de material movido al año.

De este modo se tiene los valores siguientes para cada explotación minera considerada en el estudio:

- Ritmo Cantera: 400.000 t/año
- Ritmo Mina: 16.532.000 t/año

Los datos correspondientes a la Mina objeto de estudio se han obtenido del Informe Técnico de Viabilidad del Proyecto [141]. El dato correspondiente a la producción anual de la cantera del caso de estudio se ha obtenido a partir de la Estadística Minera de España [142], correspondiente al año 2012, publicado por el Ministerio de Industria Energía y Turismo. A efectos de aplicación de la metodología desarrollada en esta Tesis Doctoral se ha considerado el valor de producción media de caliza en las canteras existentes en la provincia de Sevilla en el año 2012.

5.1.3. Indicadores específicos

En el capítulo 4.3.2 se han descrito los indicadores a emplear durante el desarrollo de la metodología para determinar diferentes impactos generados por actividades mineras. Estos indicadores serán los que se aplicarán para la evaluación de la metodología desarrollada en la presente Tesis Doctoral.

5.1.3.1. Paisaje

El impacto de una explotación minera producido sobre el paisaje en el que se ubica es difícil de cuantificar, tal y como se ha descrito en el capítulo 3.7.1. Así, para establecer la comparación de explotaciones se van a calcular el Índice de geomorfología (LI) y el Índice de pendiente (SI), calculados según Menegaki y Kaliampakos (2012) [74].

Para el cálculo de ambos índices es necesario determinar los datos relativos a altitudes y pendientes de la geomorfología inicial y final de cada uno de los proyectos.

El área de estudio correspondiente a las afecciones por el paisaje se ha correspondido con el área de terreno incluida en un rectángulo comprendido entre las coordenadas indicadas en la Tabla 15.

Tabla 15: Coordenadas áreas de estudio

Referencia	Coordenadas cartesianas		
	Código punto	Coordenada X	Coordenada Y
CANTERA	C1	752260	4158940
	C2	753225	4158940
	C3	753225	4158350
	C4	752260	4158350
MINA	M1	753805	4155954
	M2	758202	4155954
	M3	758202	4153122
	M4	753805	4153122
PUNTO OBJETIVO	P	752611	4157918

Las zonas que se han considerado que han afectado el paisaje se muestran en la Figura 48 y Figura 49. Ambas figuras representan el área comprendida entre las coordenadas mostradas en la Tabla 15.

Para el análisis de la influencia del paisaje se necesitan hacer los cálculos para el paisaje final y el paisaje inicial antes el comienzo del proyecto.

Para llevar a cabo esta interpretación, y a efectos de mostrar la metodología se ha considerado como situación final de cada una de las explotaciones con la situación actual, basada en las

ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) más recientes disponibles, y del modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m, ambos obtenidos del Instituto Geográfico Nacional [140].

Para determinar la situación inicial de la explotación se ha tenido en cuenta la topografía del terreno más antigua disponible, basada en vuelos fotogramétricos realizados en 2003, proporcionados por Google Earth.

Figura 48: Zona de Estudio Cantera. [140]

Figura 49: Zona de Estudio Mina. [140]

En el caso de estudio correspondiente al área Mina, se observa claramente la situación original de la zona explotada, puesto que en 2003, todavía no había comenzado la explotación, como puede verse en la Figura 50. En cambio para el caso del área Cantera, en 2003 ya se encontraba en explotación (Figura 51) y los cálculos se realizarán teniendo en cuenta la estimación de las cotas originales, previas a la explotación, basados en la topografía regional.

Figura 50: Zona de Estudio Mina (2003).

Figura 51: Zona de Estudio Cantera (2003)

Con los datos relativos a la zona de estudio, el valor de los indicadores serían los siguientes:

El **índice de geomorfología (LI)**, definido por la siguiente ecuación:

$$LI = \frac{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin}) - 2cov(Z_{orig}, Z_{fin})}{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin})} \quad (23)$$

Donde:

- Z_{orig} = altitudes de la topografía original
- $Var(Z_{orig})$ = varianza de la variable Z_{orig}
- Z_{fin} = altitudes de la topografía final (excavada o rehabilitada)
- $Var(Z_{fin})$ = varianza de la variable Z_{fin}
- $Cov(Z_{orig}, Z_{fin})$ = covarianza de las variables Z_{orig} y Z_{fin}

Para el caso CANTERA, el valor de LI sería:

$$LI_{CANTERA} = \frac{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin}) - 2cov(Z_{orig}, Z_{fin})}{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin})} = 0,0548 \quad (24)$$

Del mismo modo, para el caso MINA, el valor de LI sería:

$$LI_{MINA} = \frac{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin}) - 2cov(Z_{orig}, Z_{fin})}{var(Z_{orig}) + var(Z_{fin})} = 0,9512 \quad (25)$$

Por otro lado, también sería de aplicación, sobre todo por su sencillez, el empleo del parámetro establecido por Azapagic (2000), que tiene en cuenta la superficie ocupada por cada explotación, en el parámetro EI_{land}

$$EI_{land} = \sum_{l=1}^L B_l \quad (26)$$

Donde B_l , expresado en metros cuadrados, es el área ocupada por la explotación en las diferentes etapas de la mina.

Para el caso de estudio que se está considerando, la superficie de cada explotación, y por tanto el valor EI, para cada una será:

$$EI_{CANTERA}=8,041 \text{ ha}$$

$$EI_{MINA}=216,128 \text{ ha}$$

5.1.3.2. Polvo y otras emisiones

De acuerdo al capítulo 4.3.2, la emisión de polvo en una explotación minera se debe principalmente a: emisiones debidas a trabajos de perforación, emisiones debidas a los trabajos de carga de estéril, emisiones debidas a pistas de transporte, emisiones debidas a los vertederos de estéril expuestos y a emisiones debidas a la superficie de mina expuesta. De este modo, las emisiones totales serán las expresadas en la Tabla 16. Para la obtención de estos datos se han tenido en cuenta los parámetros estimados en la Tabla 17.

Tabla 16: Emisión de polvo en el caso de estudio [85]

Actividad	Ecuación empírica	Cantera	Mina
Emisiones debidas a trabajos de perforación	$E = 0,0325 \left[\frac{\frac{100-m}{s \cdot u}}{\frac{100-s}{m}} \right]^{0,1} (df)^{0,3}$	0,365024895	0,710571556
Emisiones debidas a los trabajos de carga de estéril	$E = \left[0,018 \left(\frac{100-m}{m} \right) \right]^{0,1} \left(\frac{s}{100-s} \right)^{0,4} (uhxl)^{0,1}$	0,230654581	0,298851856
Emisiones debidas a pistas de transporte	$E = \left(\frac{100-m}{m} \right)^{0,8} \left(\frac{s}{100-s} \right)^{0,1} u^{0,3} (2663 + 0,1 \cdot (v + fc)) \cdot 10^{-6}$	3,255519711	56,6383798
Emisiones debidas a los vertederos de estéril expuestos	$E = \left(\frac{100-m}{m} \right)^{0,2} \left(\frac{s}{100-s} \right)^{0,1} \left(\frac{u}{2,6 + 120 \cdot u} \right) \left(\frac{a}{0,2 + 276,5 \cdot a} \right)$	2,02534E-05	2,04287E-05
Superficie de mina expuesta	$E = \left(2,4 \frac{100-m}{m} \right)^{0,8} \left(\frac{a \cdot s}{100-s} \right)^{0,1} \left(\frac{u}{4 + 66 \cdot u} \right) \cdot 10^{-4}$	1,81657E-06	4,95581E-06
TOTAL		3,851	57,648
Los parámetros y unidades usadas son: contenido de humedad (%), m; contenido de limo (%), s; velocidad del viento (m/s), u; diámetro de perforación (mm), d; frecuencia (nº barrenos/día), f; altura de caída (m), h; tamaño de la cargadora (m³), l; velocidad media de los vehículos (m/s), v; capacidad de los volquetes (t), c; área (km²), a; frecuencia de carga (nº/h), x.			

Tabla 17: Parámetros empleados en el cálculo de las emisiones

Parámetros	Unidad	Cantera	Mina
Contenido de humedad	%	48	48
Contenido de limo	%	2	2
Velocidad del viento	m/s	1,4	1,4
Diámetro de perforación	mm	76	200
Frecuencia	Nº/ día	20	100
Altura de caída	m	3	5
Tamaño de la cargadora	m ³	3	16
Velocidad media de los vehículos	m/s	2,5	6
Capacidad de los volquetes	t	40	140
Área	km ²	0,22	5024
Frecuencia de carga	Nº/h	10	15
Longitud pistas	m	1485	17441
Área escombreras	km ²	0,08041	2,1613

5.1.3.3. Ruido

Los cálculos relativos a las afecciones por ruido se corresponden con las emisiones de ruido de la maquinaria fija o móvil de las explotaciones.

Para llevar a cabo el desarrollo de caso práctico se van a establecer las características emisivas de las potenciales fuentes de impacto para proceder al desarrollo de una estimación de la atenuación del ruido respecto al Punto Objetivo establecido. Para ello se van a describir las fuentes consideradas de cada una de las explotaciones, así como de las características que influyen en la atenuación del ruido generado. La atenuación se desarrollará según las directrices presentadas en el Capítulo 4.3.2.

De modo general se van a considerar dos perfiles topográficos establecidos desde el punto objetivo hasta cada una de las explotaciones. Los perfiles se han desarrollado de acuerdo a la ubicación mostrada en la Figura 52.

Figura 52: Ubicación de los perfiles topográficos del Caso de Estudio

Para llevar a cabo los cálculos de los valores de atenuación del ruido de acuerdo a la norma ISO 6313-2 [130] se ha considerado un valor de 2,8 para el coeficiente de atenuación atmosférica, que se corresponde con una temperatura de referencia de 20 °C y una frecuencia nominal de referencia de 500Hz; Se ha considerado un terreno de tipo poroso, al ser el terreno entre el emisor y el receptor cubierto de vegetación y/o cultivos, siendo el valor correspondiente a este tipo $G=1$; Se considera, para ambos casos una generación de sonido omnidireccional.

a) Atenuación del ruido para la explotación “Cantera”.

Las posibles fuentes de generación de ruido para el caso de la explotación cantera son la planta fija de tratamiento, la planta móvil de trituración, una pala cargadora frontal, una retroexcavadora hidráulica y un camión articulado

Los valores estándar de emisión para el equipamiento descrito son los mostrados en la Tabla 18. Del mismo modo, el perfil topográfico considerado en la Figura 52 se muestra en dos dimensiones en la Figura 53.

Tabla 18: Valores estándar de emisión para el equipamiento de Cantera

Equipamiento	Emisión (dB) [93, 94, 143]
Perforadora a rotopercusión	110 dB
Planta móvil de tratamiento	124 dB
Planta fija de tratamiento	130,3 dB
Equipo de carga	134,2 dB
Volquete	89 dB

Se ha considerado que los caballones de tierra existentes en la zona denominada “comienzo de la explotación” (Figura 53) ejercen un efecto barrera, considerando una altura de 10 metros.

Con estas consideraciones, teniendo en cuenta una el valor de emisión más desfavorable, se estima una atenuación del sonido con las condiciones estimadas de valor **86,56 dBA**, de modo que en el punto objetivo se recibe un nivel de sonido de **2,43 dBA**.

Figura 53: Perfil Topográfico Punto Objetivo-Cantera

b) Atenuación del ruido para la explotación “Mina”

Los valores estándar de emisión para el equipamiento descrito son los mostrados en la Tabla 19. Del mismo modo, el perfil topográfico considerado en la Figura 52 se muestra en dos dimensiones en la Figura 54.

Tabla 19: Valores estándar de emisión para el equipamiento de Mina

Equipamiento	Emisión (dB) [93, 94, 143]
Perforadora a rotopercusión	120 dB
Planta fija de tratamiento	130,3 dB
Equipo de carga	134,2 dB
Volquete	141,3 dB

Figura 54: Perfil Topográfico Punto Objetivo-Mina

Se ha considerado que los caballones de tierra existentes en la zona denominada “comienzo de la explotación” (Figura 54) ejercen un efecto barrera, considerando una altura de 50 metros.

Con estas consideraciones, teniendo en cuenta una el valor de emisión más desfavorable, se estima una atenuación del sonido con las condiciones estimadas de valor **128,02 dBA**, de modo que en el punto objetivo se recibe un nivel de sonido de **13,28 dBA**.

5.1.3.4. Efectos de las vibraciones generadas por voladuras

Para estimar las afecciones debidas a las vibraciones generadas por voladuras se debe hacer una modelización de la propagación de las ondas sísmicas en el terreno. Para la zona objeto de estudio, existen estudios que han estimado la ley de propagación de ondas en el terreno [144], que se corresponde con la expresión siguiente:

$$v = 11903 \cdot \left(\frac{d}{Q^{0,5}} \right)^{-1,79} \quad (27) [144]$$

Donde “v” expresa a estimación de la vibración, expresada en mm/s; “d” representa la distancia entre la generación de la perturbación y el punto de estudio, expresada en metros y “Q” es la carga operante de la voladura, expresado en kilogramos.

De este modo, la vibración estimada en el punto objetivo, para cada una de las explotaciones consideradas en el caso de estudio se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20: Predicción de vibraciones en el área de estudio

	Distancia	Carga Operante*	Vibración
Mina	4340 m	225 kg	0,467 mm/s
Cantera	880 m	80 kg	3,223 mm/s

(*)Valor estimado

La carga operante es la carga que se considera que detona a la vez. Es decir, la suma de la carga de los barrenos que detonan con un intervalo de retardo menor o igual a 8 ms [100]. De este modo, la carga operante depende de la secuenciación escogida para cada voladura, por lo que se ha estimado un valor típico para cada una de las explotaciones.

En los cálculos de estimación de las vibraciones producidas por voladuras se ha estimado que la ley de transmisión de vibraciones considerada es de aplicación para todo el área de estudio.

Para establecer el marco comparativo en el caso de estudio se ha desarrollado el parámetro E_{vol} en el capítulo 3.7.7 de la presente Tesis Doctoral, de modo que, para el presente caso de estudio se tendrán los valores de la Tabla 21 para el citado indicador:

$$E_{vol} = \frac{N \cdot t}{d^{1,6}} \cdot K \quad (28)$$

Donde:

- N: Número de voladuras por unidad de tiempo (día, semana, mes, año,...)
- t: kilos de explosivo por voladura tipo.

- d: distancia al núcleo de población (o zona sensible) más cercano.
- K=1, para explotaciones de superficie

Tabla 21: Valores del indicador Evol para el caso de estudio

E_{vol}/semana	N	t	d	E_{vol}
Mina	4	4000 kg	4340 m	0,02422
Cantera	1	1500 kg	880 m	0,02917

5.1.3.5. Subsistencia

En el caso de estudio que se desarrolla en esta Tesis Doctoral, la afección ambiental debida a los efectos producidos por la subsidencia en el terreno es nula, porque ambas explotaciones son explotaciones a cielo abierto, no generando afección alguna en este aspecto.

5.1.3.6. Residuos

La explotación Mina tiene previsto en su planificación minera una generación de residuos de **13.650 toneladas/año**, siendo éste el valor medio en los 17 años de actividad prevista [141]

En el caso Cantera, la cantidad de residuos generados, teniendo en cuenta un 0,5 % de material estéril, siendo un valor estimado de **2.000 toneladas/año**.

5.1.3.7. Consumo de energía y generación de gases de efecto invernadero

El consumo de energía y la generación de gases de efecto invernadero se ha estimado en el capítulo 3.6, relacionando estos factores con las toneladas extraídas al año en cada explotación.

Las fuentes de energía empeladas en las explotaciones son de diferente naturaleza, agrupando esta energía en valores de consumo de combustible diésel, explosivos y electricidad.

De este modo, el consumo de energía para cada una de las explotaciones objeto de estudio se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22: consumo de energía para las explotaciones objeto de estudio [86]

		Mina		Cantera	
Perforación	Diesel	0,03 kg/t	495.960,00 kg	0,03 kg/t	12.000,00 kg
Voladura	Explosivos	0,5 kg/t	8.266.000,00 kg	0,2 kg/t	80.000,00 kg
Carga y Transporte	Diesel	2,2 kg/t	36.370.400,00 kg	2,2 kg/t	880.000,00 kg
Trituración y cribado	Electricidad	2,5 kWh	41.330.000,00 kWh	2,5 kWh	1.000.000,00 kWh

Para el caso de generación de gases de efecto invernadero los resultados del caso de estudio, basados en el procedimiento descrito en el Capítulo 4.3.2, se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23: Generación de CO₂ en el caso de estudio

	Mina		Cantera	
PRODUCCIÓN/AÑO	16.532.000 toneladas		400.000 toneladas	
OPERACIÓN	kg CO ₂ /t	Toneladas CO ₂	kg CO ₂ /t	Toneladas CO ₂
- Perforación	30,80	509.185,60	0,01	3,56
- Voladura	9,10	150.441,20		
- Carga y Transporte	88,10	1.456.469,20	1,44	575,20
- Desagüe	60,30	996.879,60	0,04	16,80
- Trituración y molienda	293,70	4.855.448,40	0,95	380,00
- Concentración	19,20	317.414,40	No Aplica	No Aplica
TOTAL	8.285.838,40		975,56	

5.1.4. Resumen de indicadores

Los Indicadores considerados se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24: Resumen de indicadores. Caso de Estudio

Indicador		Unidad	Mina	Cantera
Paisaje	índice de geomorfología	--	0,9512	0,0548
	superficie ocupada	ha	216,13	8,04
Emisión de polvo		g/s	57,648	3,851
Ruido		dBA	13,28	2,43
Voladuras	Vibración	mm/s	0,467	3,223
	Evol	--	1,2593	1,5168
Residuos		t/año	13.650	2.000
Consumo energético	Diésel	kg/año	41.363.360	892.000
	Explosivos	kg/año	8.266.000,00	80.000
	Electricidad	kWh/año	41.330.000,00	1.000.000
Emisiones CO ₂		t/año	8.285.838,40	975,56

5.1.5. Modelos dinámicos

Para el desarrollo de la aplicación de los modelos dinámicos, de acuerdo a los modelos establecidos en el capítulo 4.4 al caso de estudio, es necesario establecer la duración temporal de cada una de las fases para poder comparar los diferentes proyectos. De este modo, para el caso objeto de estudio se han establecido la duración y el tiempo acumulado de la vida de los dos proyectos considerados en la Tabla 25.

Tabla 25: Duración temporal de las fases de los proyectos del caso de estudio

Fases del proyecto (Explotación) (Datos en años)		Cantera		Mina	
		Duración fases	Vida (acumulado)	Duración fases	Vida (acumulado)
1	Preparación de la actividad minera.	1	1	2	2
2	Desarrollo de las infraestructuras necesarias.	1	2	3	5
3	Apogeo. Punto álgido de la explotación.	40	42	15	20
4	Disminución de actividad.	2	44	3	23
5	Agotamiento de los recursos. Cierre	1	45	2	25
		Total	45	Total	25

Además, por otro lado es necesaria la normalización de los indicadores establecidos en el caso de estudio.

Para ello se va a considerar para cada uno de los parámetros, un valor 1 para el valor más alto de entre los indicadores de las dos explotaciones, siendo el otro valor el porcentaje proporcional correspondiente. Los indicadores normalizados del caso de estudio se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26: Indicadores Normalizados. Caso de Estudio

INDICADOR		Unidad	VALORES NORMALIZADOS	
			Mina	Cantera
Paisaje	índice de geomorfología	--	1,00000	0,05761
	superficie ocupada	ha	1,00000	0,03720
Emisión de polvo		g/s	1,00000	0,06680
Ruido		dBA	1,00000	0,18298
Voladuras	Vibración	mm/s	0,14490	1,00000
	Evol	--	0,83023	1,00000
Residuos		t/año	1,00000	0,14652
Consumo energético	Diésel	kg/año	1,00000	0,02156
	Explosivos	kg/año	1,00000	0,00968
	Electricidad	kWh/año	1,00000	0,02420
Emisiones CO ₂		t/año	1,00000	0,00012

Con objeto de apreciar el carácter comparativo de los indicadores se muestran éstos de forma gráfica en las Figura 55 y Figura 56.

Figura 55: Comparación de indicadores normalizados. Caso de Estudio

Figura 56: Comparación de indicadores normalizados. Caso de Estudio (Continuación)

5.1.6. Nivel de impacto ambiental

Una vez establecidos los indicadores, habiendo sido cuantificados y normalizados, pueden emplearse para establecer una estimación del nivel de impacto ambiental para las dos explotaciones mineras consideradas en el caso de estudio.

La cuantificación del nivel de impacto ambiental se ha descrito en el capítulo 4.5, donde se establecen unos criterios de ponderación de los diferentes impactos en base a los trabajos desarrollados por Phillips (2013) [125]. En el desarrollo de la presente Tesis Doctoral, se aplicaran estos criterios de ponderación a los indicadores seleccionados incluyendo los modelos dinámicos empleados llegando a establecer el nivel de impacto ambiental para cada una de las explotaciones.

Los factores de ponderación aplicados a cada uno de los indicadores considerados en base a la Tabla 14 se muestran en la Tabla 27.

Con los valores de ponderación mostrados en la Tabla 27 puede establecerse carácter dinámico del nivel de impacto ambiental que se muestra en la Figura 57.

Tabla 27: Factores de ponderación. Caso de Estudio

Indicador		Unidad	Mina		Cantera	
			Indicador	Ponderación	Indicador	Ponderación
Paisaje	índice de geomorfología	--	0,9512	5	0,0548	9
	superficie ocupada	ha	216,13	5	8,04	9
Emisión de polvo		g/s	57,648	7	3,851	2
Ruido		dBA	13,28	1	2,43	1
Voladuras	Vibración	mm/s	0,467	1	3,223	5
	Evol	--	1,2593	1	1,5168	5
Residuos		t/año	13.650	8	2.000	1
Consumo energético	Diésel	kg/año	41.363.360	5	892.000	5
	Explosivos	kg/año	8.266.000,00	5	80.000	5
	Electricidad	kWh/año	41.330.000,00	5	1.000.000	5
Emisiones CO ₂		t/año	8.285.838,40	7	975,56	2

Figura 57: Carácter dinámico del nivel de impacto ambiental. Caso de Estudio

Una vez que se ha establecido la evolución en el tiempo del nivel de impacto ambiental de todos los proyectos que sean susceptibles de generar impactos ambientales sobre un punto determinado, es posible hacer una estimación cuantitativa del impacto acumulativo debido a dichas fuentes de impactos ambientales.

Así, y de modo ilustrativo de aplicación de la metodología se puede establecer el nivel de impacto ambiental total debido a las dos explotaciones mineras del caso de estudio, presentando los resultados en la Figura 58. En este caso se ha considerado que los dos proyectos comienzan al mismo tiempo y la distribución porcentual de las etapas para ambos proyectos es la misma.

Figura 58: Nivel de impacto ambiental total. Caso de Estudio

Si se aplican las consideraciones tenidas en cuenta en el apartado 4.6, respecto a la posibilidad que presenta esta metodología frente a la planificación minera a escala regional, si uno de los proyectos empieza desplazado con respecto al otro, que por otro lado es el caso habitual, se varía el impacto generado. En la Figura 59 se muestra la estimación del impacto total generado si en el caso de estudio la explotación denominada “Mina” se desplaza, por ejemplo 20 años en la vida del proyecto respecto de la explotación denominada “Cantera”, o lo que es lo mismo, que el proyecto “Mina” comienza cuando el proyecto “Cantera” lleva 40 años en explotación.

Figura 59: Nivel de Impacto Ambiental total. Explotaciones con desfase

5.2. Incertidumbres de la metodología

La metodología descrita en esta Tesis Doctoral se basa en la determinación del impacto ambiental que recibe un punto determinado, debido a los efectos ocasionados desde varias fuentes de generación de impacto. Esto implica que los resultados obtenidos son únicos para cada caso. Si es necesario cambiar el punto objetivo, es necesario aplicar de nuevo la metodología.

Esta metodología es una simplificación del proceso de Evaluación de Impacto Ambiental estándar, pero, en cambio, proporciona una herramienta para comparar explotaciones y llegar a cuantificar los efectos de impactos acumulativos a escala regional.

Esta metodología se centra en los efectos ambientales producidos sobre el terreno, sin evaluar los efectos sobre la flora o fauna. Además, tampoco tiene en cuenta los efectos sobre el aspecto económico ni social, por lo que no sirve como herramienta de evaluación de la sostenibilidad.

Los modelos empleados para la estimación de indicadores están basados, principalmente, en modelos empíricos, desarrollados bajo unas condiciones determinadas y en unos escenarios concretos. Por este motivo, en el caso de que las condiciones de contorno no sean similares a las establecidas a la hora del desarrollo de los modelos (tipo de explotación, tipo de mineral

extraído, tamaño de la explotación, etc.), la aplicación de la metodología debe venir acompañada de la toma de datos en campo para verificar la validez de los modelos en las explotaciones objeto de estudio.

En el desarrollo del caso práctico se han estimado los valores de ciertos parámetros para ilustrar la aplicación de la metodología en situaciones más generales.

6. CONCLUSIONES

Para llevar a cabo una correcta gestión de los impactos ambientales, existen multitud de herramientas y técnicas entre las cuales destaca la Evaluación de Impacto Ambiental. Esta técnica ha sido considerada como una herramienta clave para evaluar la amplia variedad de impactos y cargas ambientales que acompañan a las actividades humanas.

La Evaluación de Impacto Ambiental es el método más extendido y aceptado tanto por empresas mineras como por organismos reguladores. Sin embargo, en la gran mayoría de técnicas empleadas intervienen aspectos subjetivos, que ante la falta de criterios de comparación, no se pueden emplear para determinar el nivel de impacto ambiental de varias operaciones mineras que coexistan en una misma área.

Existe un amplio marco legislativo y normativo respecto a la protección del medio ambiente, que en ocasiones se acompaña de indefiniciones e incertidumbres que hacen que sean de complicada aplicación. Entre estas indefiniciones destacan los criterios para establecer las garantías financieras obligatorias, ya que se establece que se debe cuantificar el potencial daño ambiental generado, sin establecer el marco objetivo para tal cuantificación, lo que hace que la comparación entre explotaciones mineras sea de difícil realización. Los sistemas clásicos para la Evaluación de Impacto Ambiental no establecen un marco comparativo objetivo de aplicación en explotaciones mineras.

En el desarrollo de esta Tesis Doctoral se han establecido los medios para conocer el impacto comparativo de explotaciones mineras entre sí. Con esta metodología se ha dado respuesta al problema que surge cuando en una zona determinada coexisten diversos proyectos y no es posible conocer cuál de ellos tiene menor impacto sobre una cierta área sensible.

Además, esta metodología puede servir como complemento al marco legislativo establecido en la Ley de Responsabilidad Medioambiental y los Reales Decretos que la desarrollan, donde se establece una clasificación de explotaciones que requieren determinar posibles garantías financieras para hacer frente a potenciales daños ambientales.

La herramienta desarrollada en esta Tesis Doctoral se basa en la aplicación de indicadores desarrollados en criterios empíricos que se han demostrado aplicables a diversos tipos de explotaciones mineras.

El punto de vista empleado en su desarrollo ha estado basado en la premisa de la búsqueda de indicadores que puedan establecerse de modo previo al comienzo de la explotación. Así, esta herramienta serviría para el conocimiento de las potenciales cargas ambientales previo al comienzo del proyecto.

Con la aplicación de las técnicas y herramientas de evaluación ambiental actuales no es posible establecer ni el impacto relativo entre explotaciones ni el nivel total de impacto que sufre un determinado área objeto de estudio.

La cuantificación comparativa de los impactos generados por diferentes explotaciones puede emplearse para la determinación del impacto acumulativo soportado por una determinada región. Así, la evaluación del impacto a escala regional puede ser empleada por organismos reguladores de modo que pueda llegar a aplicarse como complemento al procedimiento autoritativo preceptivo actual.

La metodología establecida supone una simplificación de las técnicas y herramientas de evaluación ambiental actuales pero esa simplificación posibilita el establecer un marco comparativo de referencia.

Los modelos dinámicos establecidos representan la evolución en tiempo de los impactos ambientales de las explotaciones mineras, aspecto que no queda cubierto con los métodos de evaluación ambiental clásicos, y que contribuye a la aportación de información para la adopción de medidas mitigadoras proporcionales en cada momento a las potenciales cargas ambientales, en función de la situación del proyecto desarrollado.

La aplicación de la metodología al caso práctico propuesto establece la cuantificación de los impactos de diferentes explotaciones mineras, de modo que puede conocerse el nivel de impacto sobre un punto definido.

En el desarrollo del caso práctico se han escogido dos explotaciones mineras de diferente dimensión y magnitud existentes en una determinada región, de modo que se muestre la mayor generalización posible. Si bien la mayor de las explotaciones consideradas presenta una mayor potencial impacto ambiental, la explotación más pequeña supera en ciertos indicadores a la más grande, poniendo de manifiesto la situación real que se presenta cuando una pequeña explotación puede generar mayor impacto que una más grande, en función de la distancia al punto objetivo y de las características de cada una.

Una vez que se ha establecido la valoración de los indicadores, para proceder a establecer la comparación entre explotaciones se hace necesaria una normalización de los indicadores, de modo que las magnitudes establecidas tengan las mismas unidades y expresen una misma magnitud.

Con las consideraciones establecidas en la metodología se ha establecido el parámetro denominado Nivel de Impacto Ambiental, que expresa un indicador cuantitativo para conocer el resultado del conjunto de todos los impactos considerados.

En la determinación del nivel de impacto ambiental en el caso de estudio, se establece que el nivel de impacto generado sobre el punto determinado en el área urbana afectada es de 44,975 para el caso del proyecto “Mina”, mientras que este parámetro alcanza el valor de 13,348 para el proyecto “Cantera”.

Se observa que el impacto del proyecto “Mina” es solo 3,37 veces mayor, siendo una explotación de mucha mayor envergadura que el proyecto “Cantera”. Este hecho viene

motivado porque en la metodología se valora la distancia de cada uno de los proyectos al punto sensible, cuantificando el hecho de que un proyecto de gran envergadura está a mayor distancia que otro.

La metodología establecida supone una simplificación de las técnicas y herramientas de evaluación ambiental actuales pero esa simplificación posibilita el establecer un marco comparativo de referencia. Por este motivo, el desarrollo de esta Tesis Doctoral se plantea como una herramienta complementaria a las técnicas de evaluación actuales, de modo que pueda establecerse tanto el impacto acumulativo, como la cuantificación del impacto de cada proyecto sobre un cierto punto.

Esta metodología puede servir como herramienta para aquellos operadores mineros que estén desarrollando estudios de viabilidad de nuevos proyectos para saber de forma previa las cargas ambientales en las que se incurriría en caso de llevarse a cabo. Adicionalmente esta metodología proporciona indicadores que facilitan información sobre qué etapas del proceso minero planificado son generadoras de mayor impacto, pudiendo así escoger las técnicas y tecnologías más adecuadas para minimizarlo.

El desarrollo de esta Tesis Doctoral abre oportunidades de nuevas líneas de investigación basadas en la aplicación del Desarrollo Sostenible en proyectos de explotación minera, continuando los análisis realizados incluyendo aspectos socioeconómicos y culturales, así como la cuantificación de la biodiversidad, aspectos que se quedan fuera del alcance de la presente Tesis Doctoral y que pueden ser impactos tanto positivos como negativos desde el punto de vista de las aportaciones del desarrollo de un proyecto a la comunidad donde tiene lugar.

Además, mediante una aplicación sistemática de esta metodología a escala regional, es decir, en puntos representativos de una determinada región, sería posible llevar a cabo el estudio de la viabilidad del desarrollo de “mapas de riesgo” de modo que puedan establecerse zonas de sensibilidad determinada en un determinado lugar.

Por otro lado, la evolución de la metodología desarrollada podría dar lugar a nuevas investigaciones encaminadas a establecer los umbrales mínimos admisibles para el nivel de riesgo obtenido en un punto determinado.

7. REFERENCIAS

- [1] Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., and S. T. Krukowski, *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses*: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006.
- [2] International Council on Mining and Metals (ICMM), "Mining's contribution to sustainable development - an overview," London, 2012.
- [3] McLellan B.C., Corder G.D., Giurco D.P., and Ishihara K.N., "Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential," *Journal of Cleaner Production*, vol. 32, pp. 32-44, Sep 2012.
- [4] Martens P.N. and Rattmann L., *Mining and society: No mining, no future*, 2001.
- [5] Connolly E. and Orsmond D., "The Mining Industry: From Bust to Boom," Reserve Bank of Australia 2011.
- [6] International Council on Mining and Metals (ICMM), "The role of mining in national economies," London, 2012.
- [7] Christmann P., Arvanitidis N., Martins L., Recoché G., and Solar S., "Towards the sustainable use of mineral resources: A European geological surveys perspective," *Minerals and Energy - Raw Materials Report*, vol. 22, pp. 88-104, 2007.
- [8] Walsh S., "Preparing for the future. RioTinto," presented at the AJM 13th Global Iron Ore & Steel Forecast Conference, Perth, Australia, 2010.
- [9] World Commission on Environment and Development, *El desarrollo sostenible, una guía sobre nuestro futuro común: El informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*: Oxford University Press, 1987.
- [10] McLellan B.C. and Corder G.D., "Risk reduction through early assessment and integration of sustainability in design in the minerals industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. In Press, 2013.
- [11] Morteza O. and Mahdi R., "Mine Design Selection Considering Sustainable Development," in *Mine Planning and Equipment Selection*, Drebenstedt C. and Singhal R., Eds., ed: Springer International Publishing, 2014, pp. 151-163.
- [12] Spitz K. and Trudinger J., *Mining and the Environment: From Ore to Metal*: Taylor & Francis Group, 2008.
- [13] Worrall R., Neil D., Brereton D., and Mulligan D., "Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine land," *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, pp. 1426-1434, 2009.
- [14] Laurence D., "Establishing a sustainable mining operation: an overview," *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 278-284, 2011.
- [15] Blinker L.R. (2009, Mining, Environment and Development. *UNCTAD - United Nations Conference on Trade and Development*, . Available:

- [http://commdev.org/userfiles/files/878 file Mining and the natural Environment.pdf](http://commdev.org/userfiles/files/878_file_Mining_and_the_natural_Environment.pdf)
- [16] Cowell S.J., Wehrmeyer W., Argust P.W., and Robertson J.G.S., "Sustainability and the primary extraction industries: theories and practice," *Resources Policy*, vol. 25, pp. 277-286, 1999.
 - [17] Morris P. and Therivel R., *Methods of Environmental Impact Assessment*, 3 ed.: Taylor & Francis, 2009.
 - [18] Miranda M., Chambers D., and Coumans C., "Framework for responsible mining: A guide to evolving standards," *Center for Science in Public Participation (CSP2), World Resources Institute (WRI)*, 2005.
 - [19] Singh R.K., Murty H.R., Gupta S.K., and Dikshit A.K., "An overview of sustainability assessment methodologies," *Ecological Indicators*, vol. 9, pp. 189-212, 2009.
 - [20] Giurco D. and Cooper C., "Mining and sustainability: asking the right questions," *Minerals Engineering*, vol. 29, pp. 3-12, Mar 2012.
 - [21] Azapagic A., "Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 12, pp. 639-662, 2004.
 - [22] Finnveden G. and Moberg A., "Environmental systems analysis tools – an overview," *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, pp. 1165-1173, 2005.
 - [23] *Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.*, Ley 21/2013, 2013.
 - [24] Xu L. and Liu G., "The study of a method of regional environmental risk assessment," *Journal of Environmental Management*, vol. 90, pp. 3290-3296, Aug 2009.
 - [25] AENOR, "UNE 150008. Análisis y evaluación del riesgo ambiental," vol. UNE 150008, ed, 2008, p. 46.
 - [26] AENOR, "UNE 157921. Criterios generales para la elaboración de estudios de impacto ambiental," vol. UNE 157921, ed, 2006, p. 20.
 - [27] Robinson C., "A tool for all seasons - Risk assessment meets the unique needs of each stage over the life of a mine," *Canadian Mining Journal*, vol. 126, pp. 21-23, Apr 2005.
 - [28] Snell T. and Cowell R., "Scoping in environmental impact assessment: Balancing precaution and efficiency?," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 26, pp. 359-376, 2006.
 - [29] Environmental Law Alliance Worldwide ELAW, *Guidebook for Evaluating Mining Project EIAs*. Eugene, OR 97403 U.S.A., 2010.
 - [30] Tukker A., "Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 20, pp. 435-456, 2000.
 - [31] Bian Z., Inyang H.I., Daniels J.L., Otto F., and Struthers S., "Environmental issues from coal mining and their solutions," *Mining Science and Technology (China)*, vol. 20, pp. 215-223, 2010.

- [32] Z.-f. Bian, H.-x. Zhang, and S.-g. Lei, "Analyses of environmental impacts of underground coal mining in an arid region using remote sensing and GIS," *Journal of Coal Science and Engineering*, vol. 17, pp. 363-371, Dec. 2011.
- [33] Curran M.A., "Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability," *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 2, pp. 273-277, 2013.
- [34] Finnveden G., Hauschild M.Z., Ekvall T., Guinée J., Heijungs R., Hellweg S., *et al.*, "Recent developments in Life Cycle Assessment," *Journal of Environmental Management*, vol. 91, pp. 1-21, 2009.
- [35] van der Voet E., Salminen R., Eckelman M., Mudd G., Norgate T., and Hirschier R. (2013). *Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles*. Available:
<http://www.unep.org/resourcepanel/Publications/EnvironmentalChallengesMetals/tabid/106142/default.aspx>
- [36] AENOR, "UNE-EN ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia," vol. UNE-EN ISO 14040, ed, 2006, p. 30.
- [37] MMSD, "A Life-Cycle Approach to Using Minerals," IIED - International Institute for Environment and Development 2002.
- [38] Awuah-Offei K. and Adekpedjou A., "Application of life cycle assessment in the mining industry," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, pp. 82-89, Jan 2011.
- [39] Durucan S., Korre A., and Munoz-Melendez G., "Mining life cycle modelling: a cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, pp. 1057-1070, 2006.
- [40] Jeswani H.K., Azapagic A., Schepelmann P., and Ritthoff M., "Options for broadening and deepening the LCA approaches," *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, pp. 120-127, 2010.
- [41] MMSD, *Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development*: IIED - International Institute for Environment and Development, WBCSD - World Business Council for Sustainable Development, 2002.
- [42] Down C.G. and Stocks J., *Environmental impact of mining*: Applied Science Publishers Ltd., 1977.
- [43] Jay S., Jones C., Slinn P., and Wood C., "Environmental impact assessment: Retrospect and prospect," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 27, pp. 287-300, 2007.
- [44] *Gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras.*, Real Decreto 975/2009, 2009.
- [45] *Directiva 2004/35/CE sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales*, Parlamento Europeo Directiva 2004/35/CE, 2004.
- [46] *Ley de Responsabilidad Medioambiental*, LEY 26/2007, 2007.

- [47] *Ley 11/2014, de 3 de julio, por la que se modifica la ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.*, Ley 11/2014, 2014.
- [48] *Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental.*, R.D. 2090/2008, 2008.
- [49] Hermoso C., "Modelo de Informe de Riesgos Ambientales Tipo para el sector siderúrgico, Sid-MIRAT.," in *CONAMA 10 - Congreso Nacional de Medio Ambiente*, Madrid, 2010.
- [50] *Ley de residuos y suelos contaminados*, Ley 22/2011, 2011.
- [51] AENOR, "UNE-EN 31010. Gestión del riesgo. Técnicas de apreciación del riesgo," vol. UNE-EN 31010, ed, 2011, p. 102.
- [52] AENOR, "UNE 150011. Gestión ambiental. Guía para la evaluación de los costes ambientales. Costes ambientales internos," vol. UNE 150011, ed, 2005, p. 42.
- [53] AENOR, "UNE 22480. Sistema de gestión minera sostenible. Requisitos," vol. UNE 22480, ed, 2008, p. 20.
- [54] AENOR, "UNE 22470. Indicadores de gestión minera sostenible," vol. UNE 22470, ed, 2008, p. 50.
- [55] Comisión Técnica de Prevención y Reparación de Daños Medioambientales, "Proyecto Piloto de Guía Metodológica. Sectores: Minería de sulfuros polimetálicos y minería de sales sódicas y potásicas," Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría de Estado de Medio Ambiente, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Medio Natural, España 2012.
- [56] Kontic B., "Why are some experts more credible than others?," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 20, pp. 427-434, 2000.
- [57] Swor T. and Canter L., "Promoting environmental sustainability via an expert elicitation process," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 31, pp. 506-514, 2011.
- [58] Peterlin M., Kross B.C., and Kontic B., "A method for the assessment of changes in environmental perception during an EIA process," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 28, pp. 533-545, Nov 2008.
- [59] Castilla-Gomez J. and Herrera-Herbert J., "Comparative criteria for environmental risk assessment in mining operations: A dynamic approach," in *13th SGEM Geoconference on Ecology, Economics, Education and Legislation*, Albena, Bulgaria, 2013, pp. 205-212.
- [60] Castilla-Gomez J. and Herrera-Herbert J., "Comparative Criteria for a Dynamic Approach to Environmental Impact Assessment and Its Influence in Mine Planning," in *Mine Planning and Equipment Selection*, Drebenstedt C. and Singhal R., Eds., ed: Springer International Publishing, 2014, pp. 685-696.
- [61] Franks D.M., Brereton D., and Moran C.J., "The cumulative dimensions of impact in resource regions," *Resources Policy*, vol. 38, pp. 640-647, Dec 2013.

-
- [62] Li J., "Environmental Impact Assessments in Developing Countries: An Opportunity for Greater Environmental Security," *USAID and FESS*, 2008.
- [63] Xu X.G., Lin H.P., and Fu Z.Y., "Probe into the method of regional ecological risk assessment - a case study of wetland in the Yellow River Delta in China," *Journal of Environmental Management*, vol. 70, pp. 253-262, Mar 2004.
- [64] Merad M.M., Verdel T., Roy B., and Kouniali S., "Use of multi-criteria decision-aids for risk zoning and management of large area subjected to mining-induced hazards," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 19, pp. 125-138, 2004.
- [65] Gupta A.K., I. V. Suresh, Misra J., and Yunus M., "Environmental risk mapping approach: risk minimization tool for development of industrial growth centres in developing countries," *Journal of Cleaner Production*, vol. 10, pp. 271-281, 2002.
- [66] Zelenakova M. and Zvijakova L., "Comparison of impact assessment legislation in the countries of Eastern Europe," in *11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference*, ed, 2011, pp. 1273-1280.
- [67] El-Fadl K. and El-Fadel M., "Comparative assessment of EIA systems in MENA countries: challenges and prospects," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 24, pp. 553-593, 2004.
- [68] Albrecht E., "Implementing the Espoo Convention in transboundary EIA between Germany and Poland," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 28, pp. 359-365, Aug 2008.
- [69] Hildén M. and Furman E.R., "Assessment across borders: Stumbling blocks and options in the practical implementation of the Espoo Convention," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 21, pp. 537-551, 2001.
- [70] Bridge G., "Contested terrain: Mining and the environment," *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 29, pp. 205-259, 2004.
- [71] Welsh Office - Department of Environment. (2004). *Minerals Technical Advice Note 1: Aggregates*. Available: <http://wales.gov.uk/docs/desh/policy/040331aggregatesmtanen.pdf>
- [72] Zhang J., Fu M., Hassani F.P., Zeng H., Geng Y., and Bai Z., "Land Use-Based Landscape Planning and Restoration in Mine Closure Areas," *Environmental Management*, vol. 47, pp. 739-750, May 2011.
- [73] Vymazal J. and Sklenicka P., "Restoration of areas affected by mining," *Ecological Engineering*, vol. 43, pp. 1-4, 2012.
- [74] Menegaki M. E. and Kaliampakos D. C., "Evaluating mining landscape: A step forward," *Ecological Engineering*, vol. 43, pp. 26-33, Jun 2012.
- [75] Cai L., Wu K., Zheng R., and Li R., "Mining Subsidence Calculation System," in *2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science (ICIECS)*, 2010, pp. 1-3.
- [76] Kratzsch H. and Fleming R.F.S., *Mining Subsidence Engineering*: Springer, 1983.
-

-
- [77] Ezquerro Martín P., "Diseño de un sistema de auscultación de subsidencias mediante técnicas geomáticas," Ingeniero Geólogo, Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013.
- [78] International Finance Corporation, "Environmental, Health and Safety Guidelines for Mining," World Bank Group, 2007.
- [79] Unlu T., Akcin H., and Yilmaz O., "An integrated approach for the prediction of subsidence for coal mining basins," *Engineering Geology*, vol. 166, pp. 186-203, Nov 8 2013.
- [80] Lee F.T. and Abel J.F., "Subsidence from Underground Mining Environmental Analysis and Planning Considerations," USA, 1983.
- [81] Darling P., *SME Mining Engineering Handbook*: Society for Mining Metallurgy, 2011.
- [82] Wilkin R.T., "Metal Attenuation Processes at Mining Sites," U.S. Environmental Protection Agency, Ground Water and Ecosystems Restoration Division of the National Risk Management Research Laboratory 2007.
- [83] United Nations Environment Programme, "Mining and sustainable development II: Challenges and perspectives," *Industry and Environment*, vol. 23, 2000.
- [84] Drew L.J., Langer W.H., and Sachs J.S., "Environmentalism and Natural Aggregate Mining," *Natural Resources Research*, vol. 11, pp. 19-28, 2002.
- [85] Chakraborty M. K., Ahmad M., Singh R. S., Pal D., Bandopadhyay C., and Chaulya S. K., "Determination of the emission rate from various opencast mining operations," *Environmental Modelling & Software*, vol. 17, pp. 467-480, 2002.
- [86] T. Norgate and N. Haque, "Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations," *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, pp. 266-274, Feb 2010.
- [87] Bascetin A., Adiguzel D., Tuylu S., Karadogan A., and Caglayan M., "The Control of Energy Consumption and The Investigation of CO₂ Emissions in The Production of Aggregate," *Gazi University Journal of Science*, vol. 24, pp. 647-56, 2011 2011.
- [88] Mudd G., "Prediction of Greenhouse Gas Emissions for the Olympic Dam Mega-Expansion," Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Victoria, Australia 2009.
- [89] Norgate T. and Jahanshahi S., "Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be?," *Minerals Engineering*, vol. 24, pp. 1563-1570, Nov 2011.
- [90] Norgate T. and Haque N., "Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production," *Journal of Cleaner Production*, vol. 29-30, pp. 53-63, Jul 2012.
- [91] *Assessing and Mitigating Noise Impacts*, New York State DEP-00-1,, 2000.
-

-
- [92] Kisku G.C., Barman S.C., Kidwai M.M., and Bhargava S.K., "Environmental impact of noise levels in and around opencast bauxite mine," *Journal of Environmental Biology*, vol. 23, pp. 51-56, Jan 2002.
 - [93] BSI-British Standards, "BS 5228-1:2009. Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites – Part 1: Noise," ed, 2009, p. 164.
 - [94] Department of Consumer and Employment Protection. (2006). *Noise Control in Mines - Guideline: Resources Safety*. Available: www.docep.wa.gov.au/ResourcesSafety
 - [95] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2006). *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la exposición de los trabajadores al ruido*. Available: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Ficheros/gu%C3%ADa_t%C3%A9cnica_ruido.pdf
 - [96] Rajaram V., Dutta S., and Parameswaran K., *Sustainable Mining Practices: A Global Perspective*: Taylor & Francis, 2005.
 - [97] Raina A.K., Chakraborty A.K., Choudhury P.B., and Sinha A., "Flyrock danger zone demarcation in opencast mines: a risk based approach," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 70, pp. 163-172, Feb 2011.
 - [98] AENOR, "UNE 22381-93. Control de vibraciones producidas por voladuras," vol. UNE 22381-93, ed, 1993, p. 12.
 - [99] Ellwood D., "Guideline. Noise and vibration from blasting," Queensland Government 2006.
 - [100] Bernaola-Alonso J., Castilla-Gomez J., and H.-H. J., *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas., 2013.
 - [101] Workman J.L. and Calder P.N., "Flyrock prediction and control in surface mine blasting," presented at the Proceedings of the 20th ISEE conference on explosives and blasting technique, Austin, Texas, 1994.
 - [102] Hustrulid W.A., *Blasting Principles for Open Pit Mining*: Taylor & Francis, 1999.
 - [103] Castilla-Gomez J. and Herrera-Herbert J., "Environmental risk assessment in open pit blasting operations: Compliance with ISO 31010," in *22nd World Mining Congress & Expo*, Istanbul, Turkey, 2011.
 - [104] Gray N. F., "Environmental impact and remediation of acid mine drainage: A management problem," *Environmental Geology*, vol. 30, pp. 62-71, Mar 1997.
 - [105] BioteQ Environmental Technologies. (2010). *Acid Mine Drainage (AMD) / Acid Rock Drainage (ARD)*. Available: <http://bioteq.ca/services/solutions-for-mining/acid-mine-drainage-amd-acid-rock-drainage-ard/>
 - [106] Price W.A. and Errington J.C. (1998). *Guidelines For Metal Leaching and Acid Rock Drainage at Minesites in British Columbia*. Available:
-

- <http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Permitting-Reclamation/ML-ARD/Pages/Guidelines.aspx>
- [107] Coil D., McKittrick E., Mattox A., Hoagland N., Higman B., and Zamzow K. (2013). *Acid Mine Drainage*. Available: <http://www.groundtruthtrekking.org/Issues/MetalsMining/AcidMineDrainage.html>
 - [108] Akcil A. and Koldas S., "Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies," *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, pp. 1139-1145, 2006.
 - [109] U.S. Environmental Protection Agency, "EPA's National Hardrock Mining Framework," U.S. Environmental Protection Agency, Washington 1997.
 - [110] Sengupta M., *Environmental Impacts of Mining: Monitoring, Restoration, and Control*: Lewis Publ., 1993.
 - [111] Lottermoser B.G., *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*: Springer, 2007.
 - [112] Haixia W., "Characteristics of Acid Mine Drainage and Its Pollution Control," in *4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE)*, 2010, pp. 1-3.
 - [113] Tremblay A. and C. M. Hogan. (2000). *MEND Manual Volume 3. Prediction of ARD*. Available: <http://www.mend-nedem.org>
 - [114] Mills C., "An Introduction to Acid Rock Drainage," presented at the Acid Rock Drainage Seminar, Vancouver, British Columbia, Canada,, 1995.
 - [115] Noble B.F., *Introduction to Environmental Impact Assessment: A Guide to Principles and Practice*: Oxford University Press, 2006.
 - [116] Anawar H.M., "Impact of climate change on acid mine drainage generation and contaminant transport in water ecosystems of semi-arid and arid mining areas," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 58–60, pp. 13-21, 2013.
 - [117] Nordstrom D.K., "Acid rock drainage and climate change," *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 100, pp. 97-104, 2009.
 - [118] Brough C.P., Warrender R., Bowell R.J., Barnes A., and Parbhakar-Fox A., "The process mineralogy of mine wastes," *Minerals Engineering*, vol. 52, pp. 125-135, 2013.
 - [119] Allett E.J., "Environmental Impact Assessment and Decision Analysis," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 37, pp. 901-910, Sep 1986.
 - [120] Naranjo R., "Modelo de riesgo para la evaluación económico financiera de proyectos mineros," Ingeniería de Minas, Tesis Doctoral, Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2005.
 - [121] Raff M., "Ten principles of quality in environmental impact assessment," *Environmental and Planning Law Journal*, vol. 14(3), p. 15, 1997.

- [122] Hammond A.L., Adriaanse A., Rodenburg E., Byant D., and Woodward R., *Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development*: World Resources Institute, 1995.
- [123] Folchi R., "Environmental impact statement for mining with explosives: A quantitative method," presented at the Proceedings of the Twenty-Ninth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Vol 2, Nashville, Tennessee, USA, 2003.
- [124] Monjezi M., Shahriar K., Dehghani H., and Namin F. S., "Environmental impact assessment of open pit mining in Iran," *Environmental Geology*, vol. 58, pp. 205-216, Jul 2009.
- [125] Phillips J., "The application of a mathematical model of sustainability to the results of a semi-quantitative Environmental Impact Assessment of two iron ore opencast mines in Iran," *Applied Mathematical Modelling*, vol. In Press, 2013.
- [126] Poveda C.A. and Lipsett M.G., "Using sustainable development indicators (SDIs) for sustainability assessment of surface mining operations in the oil sands projects: applicability, usefulness and cost " *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, vol. 176, 2013.
- [127] Jørgensen S.E., Xu L., and Costanza R., *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health, Second Edition*. USA: CRC Press - Taylor & Francis, 2010.
- [128] Azapagic A. and Perdan S., "Indicators of Sustainable Development for Industry: A General Framework," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 78, pp. 243-261, 2000.
- [129] Herrera-Herbert J., *Introducción a los Fundamentos de la Tecnología Minera*. Madrid: Laboratorio de Laboreo de Minas, 2006.
- [130] International Standard Organization, "ISO 9613-2 - Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation," ed, 1996.
- [131] J. Castilla-Gómez, "Viabilidad de ejecución de voladuras para la construcción de un túnel ferroviario de alta velocidad sin afecciones sobre otro túnel carretero existente. Túnel dle Rabo de la Sartén (Valencia)," in *Ingeotúneles*. vol. 14, C. López Jimeno, Ed., ed Madrid: U.D Proyectos, ETSI Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 2008, pp. 409-426.
- [132] Castilla-Gomez J., Fernández de Miguel I., and Angulo A., "Empleo de detonadores electrónicos en voladuras de zonas críticas. Túnel de Mesperuza (Vizcaya)," in *Ingeotúneles*. vol. 16, C. López Jimeno, Ed., ed Madrid: U.D. Proyectos, ETSI Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 2009, pp. 379-400.
- [133] Aznar-Salineró J., *Trabajos en roca*: Cie Inversiones Editoriales Dossat 2000, 2006.
- [134] Jianjun S., Chunjian H., Ping L., Junwei Z., Deyuan L., Minde J., *et al.*, "Quantitative prediction of mining subsidence and its impact on the environment," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 22, pp. 69-73, 2012.

- [135] Hilson G., "Pollution prevention and cleaner production in the mining industry: an analysis of current issues," *Journal of Cleaner Production*, vol. 8, pp. 119-126, 2000.
- [136] U.S. Environmental Protection Agency, "Acid mine drainage prediction," Washington, USA EPA 530-R-94-036 NTIS PB94-201829, 1994.
- [137] Skousen J.G., Rose A., Geidel G., Foreman J., Evans R., and Hellier W., *Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of Acid Mine Drainage*: National Mine Land Reclamation Center, West Virginia University, 1998.
- [138] Namin F., Shahriar K., and Bascetin A., "Environmental impact assessment of mining activities. A new approach for mining methods selection," *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, vol. 27, pp. 113-143, 2011.
- [139] Gómez-Márquez I., Alejano L.R., and García Bastante F., "Mining compatibility with other projects in Spain: Solutions and benefits," *Resources Policy*, vol. 36, pp. 22-29, 2011.
- [140] LiDAR-PNOA cedido por © Instituto Geográfico Nacional de España. (2014).
- [141] Pincock Allen & Holt, "Technical Report of the Las Cruces Copper Project, Southern Spain," Lakewood, Colorado, USA, 2005.
- [142] Ministerio de Industria Energía y Turismo, "Estadística Minera de España 2012," Madrid, España, 2012.
- [143] Dubois A., Rodríguez T., Pérez A.M., and Gil M., "Riesgo a la Exposición al Ruido en las Canteras de Granito," in *Fourth International Conference on Occupational Risk Prevention – ORP2006*, Sevilla, España, 2006.
- [144] Pascual J., Sanchidrian J.A., and Segarra P., "Surface vibration measurements from deep hole blasts," in *Proceedings of the Twenty-Eighth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Vol II*, 2002, pp. 217-230.