

Gestión de riesgo en decisiones de inversión minera: un enfoque global

José Antonio Botín

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. UPM. c/ Ríos Rosas, 21 28003 Madrid. Spain.
jabotin@iies.es

RESUMEN

La cuantificación del riesgo económico asociado a las decisiones de inversión en minería es un desafío crítico para ejecutivos de empresas mineras e inversores. Sin embargo, el análisis de riesgo en la mayoría de los estudios de viabilidad final se basa en modelos estocásticos del Valor Actual Neto (VAN) que, generalmente, no cuantifican el riesgo asociado a la incertidumbre en las variables técnicas y de gestión del proyecto y, por tanto, son de escaso valor para la toma de decisión de viabilidad del proyecto. Este artículo, en parte basado en otras publicaciones del autor, analiza la inversión minera como un proceso escalonado de decisión bajo incertidumbre y riesgo y propone un modelo metodológico global para la gestión de riesgo en la cadena de valor del proyecto, con foco en la cuantificación del riesgo y la optimización del valor añadido. El artículo incluye un caso de estudio en el que se valida el modelo mediante su aplicación a un yacimiento de cobre en Chile.

Palabras clave: Gestión del riesgo, Minería, Optimización, Proyectos, Valor añadido.

Managing Risk in Mining Investment Decisions: A Global Focus

ABSTRACT

Quantifying risks associated to mining investment decisions is a key challenge for the mineral industry executives and investors. However, risk analysis in most bankable mine feasibility studies is based on stochastic modelling of the net present value (NPV) of a project which, in most cases, fails to quantify risk associated to uncertainty on technical and management variables of the project and, as a result, are of little use for feasibility decision taking. This paper is, in part, based on the author's publications, discusses mining investment as stepwise decision process under uncertainty and risk and proposes a global methodological model for the management of risk throughout the project value chain, focusing on risk quantification and value-added optimization. The paper includes a case study where the model is validated by its application to a copper ore body in Chile.

Keywords: mining, optimization, projects, risk management, value added.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction

The management of a mining project can be seen as a stepwise investment process, where increasingly larger amounts of capital are invested through time to reduce uncertainty and financial risk. At the end of each stage, a drop/continue decision is taken based on existing information and, if the decision is to continue, the project enters the next stage of evaluation at a higher capital intensity. At the last stage, the project may reach a level of financial risk which is acceptable to investors and proceed to development. In this process, the initial stages in which a mineral deposit has not yet been discovered are referred to as "exploration stages". Once a mineral deposit has been discovered and ore resources can be measured, the investment process advances to the "development stages".

Obviously, investing in mining exploration or development bears a significant exposure to risk related to the uncertainty regarding the parameter of the project, both intrinsic and extrinsic, which influence the expect-

ted profit. However, in most cases, investment decisions are based on stochastic DCF-NPV models that hardly provide any information about the economic impact (positive or negative) associated to the technical and management uncertainties and, as a result, are of little value as project risk management and optimization tools.

Literature on mining investment risk is abundant, but a global decision risk methodology is lacking. Existing publications focus on a specific source of risk (e.g. resources, mine planning) or the evaluation of the sensitivity of the profitability of the project to the variation of key project parameters but, in most cases, fail to identify the origin of risk and its impact on the different stages of the value chain of a project (Li, S. et al., 2004).

There is increased criticism of DCF analysis as a single measure of project value, namely why use a single risk adjusted discount rate when there are aspects of a project associated with different levels of risk? (Whittle, G., Strange, W., and Hanson, N. 2007). Moreover, capital investment decisions cannot rely on static parametric evaluations, such as DCF, as these methods only provide a picture of the value of a project associated to a "base case" scenario but fail to consider the dynamic character of decision making during the life of the project (Guj, P. and Garzon, R. 2007).

This paper discusses capital investment in exploration and mining projects as a decision process under uncertainty and risk and describes the MPRM risk management methodology (Botín J.A, Guzman, R. and Smith, M. 2011), a methodological framework focusing on the management of the mining project investment decision as part of a stepwise value added and optimization process.

The MPRM Risk Management Methodology

Risk may be classified by its economic impact and probability of occurrence. High probability-high impact risks (Class A) are those that, if undetected at the pre-feasibility stages, may render the project unfeasible. In most cases, Class A risks are associated to the upstream processes of mining projects (e.g. resource evaluation and conceptual definition) and therefore will impact all subsequent (downstream) processes in the value chain. An example of a Class A risk would be selecting the block caving mining method under an unacceptable uncertainty on the caveability of the hanging wall rocks. The consequence would be massive losses in development capital and production.

Low impact-high probability risks (Class B) are derived from uncertainty and potential hazards in the basic engineering of the project. In this case, the risk management process should focus on identifying and reducing risk by means of further data acquisition and by applying optimization during the design process. An example of Class B risk would be the design of the mill size under uncertainty regarding the grindability of the ore. The consequence may be poor mill performance, but the error is correctable – at an unforeseen cost and with a temporary loss of production. Low probability-high impact risks (Class C) are generally associated with site selection or plant layouts and the potential hazards relative to unlikely events of a catastrophic nature (e.g. floods, tailings, dam failure, etc.). Class C risks are normally managed at the early stages of engineering stages through adequate site selection and layout, emergency planning and proper risk insurance coverage. Low impact-low probability risks (Class D) are risks which must be assumed by investors since the costs of reducing or eliminating them is higher than the potential benefits achieved. These should be managed through allowing for contingency funds in capital and operating costs.

MPRM is a risk management approach where project risk is evaluated at each step of the value chain (Figs. 5 and 6). In this approach, risk management and optimization become part of a single stepwise value-added process. A key feature of MPRM is that the project risk is characterized by a risk model (The P model), a 3-D risk bearing matrix (Fig. 7), where each risk parameter (P_{ijk}) is associated to a process (i), an activity or sub-process (j) and a source of uncertainty (k). The table in Figure 8 presents some typical sources of uncertainty in mining project. Risk and value-added potential are quantified for each (P_{ijk}); therefore, MPRM methodology lends itself to optimization and the efficient allocation of financial resources to project processes with maximum value-adding potential.

As an example (Fig. 9), the first process in the value chain (e.g. orebody evaluation) comprises of eight sub-processes: exploration drilling; hole logging & testing; sample preparation and assaying; chemical assays; data processing; geological interpretation; block modelling and resource evaluation. For the sub-process "hole logging and testing", six risk bearing parameters P were identified and linked to several sources of uncertainty, as in Figure 10.

The last stage in MPRM methodology is quantifying uncertainty and risk. The risk evaluation method used for each parameter P mainly depend on the sources of uncertainty and the relative economic impact, as per the 2-D risk model in Figure 4. Class A risks are mainly derived from uncertainty in the ore resources and the conceptual definition of the project, and may be quantified on the basis of the Expected Utility Principle, where the "value at risk" may be quantified as the difference between the expected utility (NPV) for the most

likely scenario (Base Case) and a "risk free" scenario, resulting from a probability distribution (e.g. 95% confidence limit) or an expert judgment of a conservative value for the parameter P . The optimization potential (i.e. value added) may be represented by the difference the estimated "value at risk" and the cost of eliminating the source of risk. Statistical tools, Real Option Evaluation, and conditional simulation in combination with global optimizers such as Whittle are useful at this stage.

Class B risks are mainly related to uncertainty in basic engineering and other downstream processes. In most cases, the source of uncertainty may be modelled by means of a probability function. Therefore, the economic impact (value at risk) may also be estimated based on the "Expected Utility Principle" by means of real options and stochastic simulation tools, etc. In this case, the optimization potential (i.e. value added) may also be quantified as the difference between the estimated economic impact and the extra cost of a conservative or "risk free" basic engineering design. Class B also comprises the risks related to uncertainty regarding market, finance, social and political scenarios and other parameters which are extrinsic to the project. These risks are managed by estimating the NPV outcome and the probability of occurrence of different scenarios (e.g. most likely, pessimistic, optimistic, etc.) Decision tree models and Monte Carlo simulation are the most commonly used tools. Although seldom used, linear programming, integer programming and other OR tools are well suited for the evaluation of these types of risks. Class C risks (e.g. impact of earthquakes, floods, tailings, dam failure, etc.) are quantified by the extra cost minimizing them through an improved site selection and layout, emergency planning and proper risk insurance coverage. Class D risks (e.g. risks which are remnant in the bankable project), are quantified by adequate contingency funds to cover fluctuations in capital and operating costs.

Conclusions

MPRM is an innovative value-chain oriented methodology for risk management and project optimization of mining assets at the exploration, pre-feasibility and final feasibility stages, mineral exploration budgeting, due diligence analysis and risk management of operational mines. A key feature of MPRM is that project risk is modelled by a 3-D risk bearing matrix, where each cell P_{ijk} represents the risk associated to a process (i), an activity or sub-process (j) and a risk origin (k).

In MPRM, risk and value-added potential are quantified for each risk bearing parameter (P_{ijk}) and therefore, this methodology lends itself to optimization and the risk efficient allocation of financial resources to project processes with maximum value-adding potential.

MPRM methodology may be used to assist management in the evaluation of both risk and upside potential of a mining investment decision. Some examples of capital investment decisions where MPRM can be applied include: i) the valuation of mineral exploration rights; ii) the efficient allocation of resources to a multi-target exploration budget; iii) assisting capital cost estimation and efficient allocation of funds to risk management in project feasibility stages; iv) due diligence for the acquisition of mineral assets; v) risk management at the operations stage.

Introducción

Un proyecto minero puede visualizarse como un proceso de decisión por fases, desde la exploración hasta la decisión de viabilidad final, con inversión de capital creciente en cada fase, y foco en la reducción progresiva de la incertidumbre técnica y del riesgo económico. En este proceso, el proyecto alcanza viabilidad económica ("Bancabilidad") cuando el riesgo se reduce a niveles asumibles por los inversores.

Es evidente que la decisión de invertir en minería implica una fuerte exposición al riesgo por la incertidumbre asociada a parámetros intrínsecos y extrínsecos del proyecto, que influyen sobre las expectativas de beneficio. Sin embargo, en la mayoría de los casos, las decisiones de inversión se basan en modelos estocásticos del Valor Actual Neto (VAN) que ape-

nas proporcionan información cuantitativa del impacto económico (positivo o negativo) asociado a la incertidumbre y, como resultado, son de escaso valor como herramienta de gestión del riesgo y optimización de proyecto.

Existen numerosas publicaciones que estudian el riesgo económico en proyectos mineros (Newman, A. et al., 2010; Snowden, D., Glacken, I.; Noppe, M., 2002 y Hebblewhite B.K., 2007). Sin embargo, son escasas las que se enfocan en aspectos de gestión y no hemos encontrado ninguna que esté enfocada en el proceso de decisión por fases que caracteriza a la inversión minera, por lo que resultan poco útiles como herramienta de gestión y toma de decisión (Morley, A., 2007).

La incertidumbre asociada al proceso de estimación de reservas de mineral y el plan de producción,

es frecuentemente el que implica mayor riesgo económico. (Li, S. et al, 2004) destaca la simulación estocástica como herramienta adecuada en la evaluación de la incertidumbre tanto en las reservas de mineral como en el diseño geométrico y la planificación de producción. (Vielma J.P., Espinoza, D and Moreno, E. 2009) proponen una metodología de simulación condicional que permite incorporar la gestión de riesgo en el proceso del diseño y estudia el efecto del número de simulaciones sobre la geometría de diseño de la corta limite.

La simulación Monte Carlo es aun la metodología convencional para la evaluación del riesgo asociado a los parámetros técnicos del proyecto (e.g. costes de capital y operación, leyes y recuperación metalúrgica, etc.), existiendo numerosas publicaciones sobre el tema. Las evidentes limitaciones de la Simulación Montecarlo como método de gestión del riesgo han sido abordadas en varias publicaciones. (Whittle, G., Strange, W., and Hanson, N. 2007) describen una metodología que denomina "Global Optimizer", que combina la Simulación Montecarlo convencional con el método de Lerchs-Grossman para la optimización del diseño de corta, que permite optimizar el VAN del plan de producción a lo largo de la vida de la mina. Asimismo (Guj, P. and Garzon, R. 2007) inciden sobre las limitaciones de la Simulación Montecarlo convencional por no tener en cuenta la variación del precio del "commodity" durante la vida del proyecto propone la metodología "Modern Asset Pricing" (MAP), basada en "Opciones Reales" como complemento del análisis DCF ("discounted cash flow"). Sin embargo (Botin J.A et al.. 2013), esta metodología presenta la misma debilidad fundamental que el método determinístico de análisis de sensibilidad: Que se basa en la evaluación "estática" de un escenario o "Caso Base" y, por tanto, no tienen en cuenta el carácter dinámico de los procesos de decisión como medio de mejorar el rendimiento económico después de la puesta en producción del proyecto. Por ejemplo, si durante la operación, baja el precio del mineral, una adecuada gestión de la ley de corte operacional permitiría mitigar los efectos económicos durante el ciclo de bajo precio. (Samis, M. et al., 2011) afirma que el método de evaluación de proyectos mediante Opciones Reales (ROV), permite tener en consideración el potencial de mejora relacionado con futuras decisiones de gestión, logrando así optimizar la evaluación.

En este artículo se analizan las inversiones de capital en la industria minera como un proceso de decisiones bajo incertidumbre y riesgo, se describen los distintos tipos de riesgo financiero en los proyectos mineros y se presenta el modelo de gestión de ries-

gos MPRM (Botín J.A, et al. 2011), un marco metodológico enfocado a apoyar la toma de decisión de inversión en cada etapa de la cadena de valor del proyecto, dentro de un proceso de control de riesgo y optimización del valor añadido.

El riesgo en los procesos de inversión minera

Como se ha comentado, un proyecto minero puede visualizarse como un proceso de decisión por fases, con foco en la reducción progresiva de la incertidumbre y el riesgo económico. En este proceso, las fases en las que aún no se ha descubierto un yacimiento se denominan "exploración". Una vez se ha descubierto un yacimiento potencialmente explotable, el proceso entra en las "fases de desarrollo".

El Canadian Minerals Yearbook (NRCanada, 2008), distingue las seis fases de exploración de la Figura 1. Al concluir cada fase, se prepara un informe final y una recomendación sobre la decisión a tomar (descartar el proyecto o seguir explorando). En caso de recomendación sea continuar el proyecto, se presenta un plan y un presupuesto de los trabajos a realizar en la fase siguiente.

En etapa de "desarrollo" se distinguen tres fases bien diferenciadas (Figura 2). En la fase de evaluación conceptual (Fase I), se define el perfil del proyecto, incluyendo un estudio preliminar de método de explotación, proceso metalúrgico y ritmo de producción. La fase concluye con un análisis económico basado en una estimación preliminar de costes de capital y operación de error máximo de -30% a +50%, de "Clase 4" (AACE, 2016). El foco de esta fase es tratar de demostrar la inviabilidad económica del proyecto, aunque evitando que un buen proyecto sea descartado.

La fase II (Evaluaciones pre-viabilidad) se enfoca a la reducción de la incertidumbre en los parámetros críticos, y la optimización técnica y económica del proyecto mediante el planeamiento y el análisis de alternativas. La incertidumbre se reduce aumentando la densidad de sondeos del yacimiento, estudiando la competencia del macizo rocoso, realizando ensayos y estudios de detalle del método de explotación, el proceso metalúrgico y otros parámetros críticos (e.g. impactos ambientales y sociales, suministro de agua, gestión de estériles y efluentes, etc..). La fase concluye con un análisis económico basado en ingeniería y diseño básicos y estimación de costes de error máximo -20% a +30%, de "Clase 3" (AACE, 2016).

En la fase III (viabilidad final), se realiza en diseño e ingeniería básica de la alternativa elegida en la Fase II, sondeos adicionales para probar reservas extraíble

- IP :** Síntesis de la información, cartografía y bases de datos disponibles.
- Ex-1:** Plan de trabajos y selección de minerales y zonas de interés.
- Ex-2:** Exploración regional para definir objetivos de exploración detallada (“targets”)
- Ex-3:** Exploración de detalle y definición de anomalías para sondeos.
- Ex-4:** Sondeo de verificación de anomalías y redefinición de objetivos de sondeo
- Ex-5:** Sondeos de delimitación de yacimiento y primera estimación de recursos

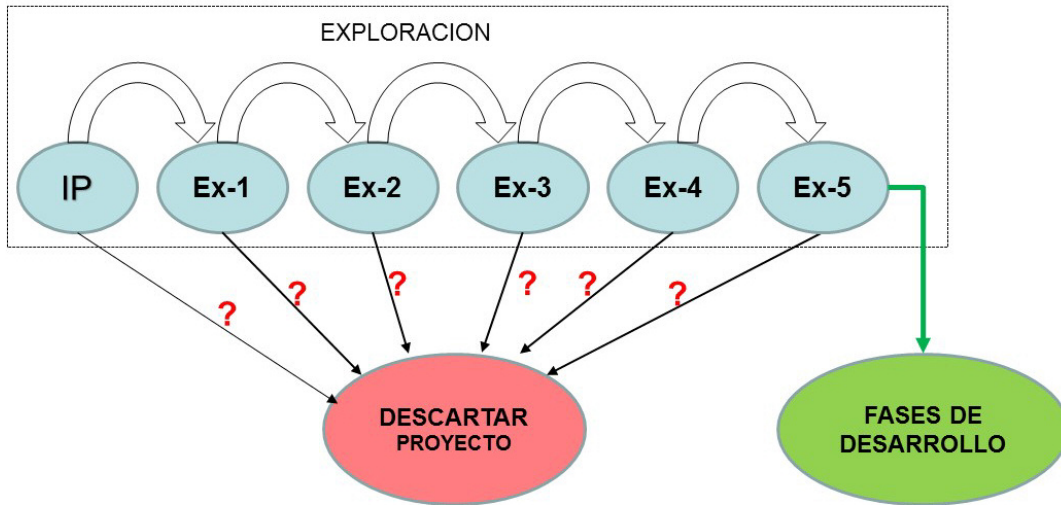


Figura 1. Fases del proceso de inversión en exploración minera.
Figure 1. Phases of the mineral exploration process.

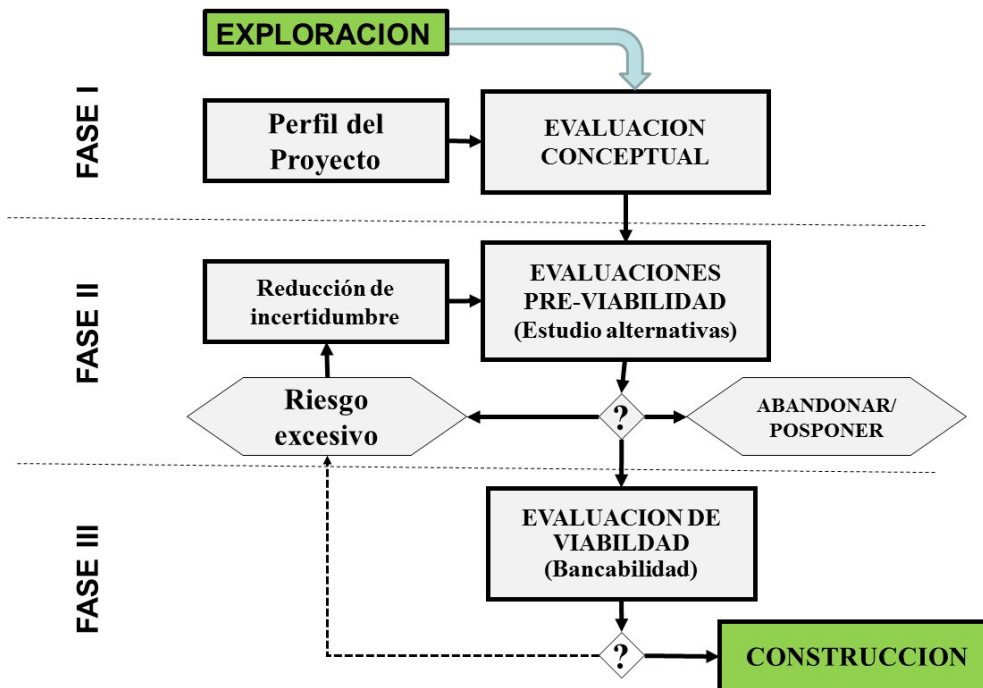


Figura 2. Fases del proceso de desarrollo del proyecto minero.
Figure 2. Phases of the development process in a mining project.

suficientes, y una estimación de costes de error máximo -15% a +20%, de "Clase 2" (AACE, 2016). Además, deben conseguirse todos los permisos administrativos, los derechos de agua y energías, los contratos de venta de concentrados, y el plan de financiación del proyecto.

La Fase III concluye con el Estudio de Viabilidad Final del proyecto y su presentación a la Administración, accionistas, entidades financieras, y demás participantes del proyecto (Stakeholders). Para que éste estudio pueda servir de base para la financiación del proyecto, debe ser considerado como "Bancable" por los inversores.

El proceso de inversión minera se caracteriza por su foco en la reducción del riesgo asociado a los parámetros del proyecto que inciden sobre la utilidad económica y la viabilidad del proyecto. Si el proceso se conduce adecuadamente, el riesgo, medido como producto del potencial económico y la probabilidad de éxito, debe disminuir en cada fase. En el gráfico de la Figura 3, se representa el riesgo en proyectos de exploración "grassroots", medido como número de proyectos que alcanzan una fase determinada, a partir de 1000 programas en fase de información previa (IP). Se deduce que solo un tercio de los proyectos logra identificar anomalías que justifiquen la perforación de sondeos (Fase Ex-3), que solamente el 1% logra delimitar un cuerpo mineralizado y únicamente el 0,5% alcanza las fases de desarrollo. De hecho, el valor de un derecho minero en fase de exploración suele estimarse en base a la inversión eficaz realizada (principio de contribución), sin que se tenga en cuenta el potencial de beneficio ya que la probabilidad de

que el activo llegue a generar beneficio se considera nula.

Atendiendo a los parámetros de riesgo, (Eggert, R.G., 2010), propone una clasificación en cuatro grupos o categorías, atendiendo a su carácter y origen:

Geológicos o del yacimiento: Son parámetros que caracterizan al yacimiento y son decisivos en la elección de método de explotación y proceso metalúrgico. Los más significativos son la génesis del yacimiento, profundidad, tamaño, geometría, mineralogía, propiedades geotécnicas, tamaño de liberación, etc...

Técnicos: Parámetros de riesgo relacionados con la ubicación geográfica de la propiedad minera y que son decisivos en el volumen de inversión o CAPEX del proyecto. Los más destacados son la remotidad, las infraestructuras existentes en la zona, la tecnología disponible, la presencia de otras minas en la zona, etc...

Riesgos medioambientales, sociales y políticos: Son riesgos relacionados con la estabilidad política y social del país, la legislación minera y medioambiental, las políticas tributarias etc...

Riesgos económicos: Son parámetros de riesgo extrínsecos al proyecto que pueden influir decisivamente en el resultado económico. Los más críticos son el precio del mineral vendible, y los tipos de cambio.

Atendiendo a al impacto económico y probabilidad de concurrencia, el riesgo de un proyecto minero pueden clasificarse y analizarse según el modelo impacto-probabilidad de la figura 4.

Los riesgos con alta probabilidad y alto impacto (Clase A) son aquellos que, de no ser detectados en las etapas de pre-viabilidad, pueden ser causa de inviabilidad para el Proyecto. En proyectos mineros, los riesgos de la Clase A, suelen asociarse a las etapas "aguas arriba" del proyecto (e.g. evaluación del yacimiento y definición conceptual, con potencial de generar fuertes impactos económicos sobre los procesos "aguas abajo" en la cadena de valor. Un ejemplo típico de riesgos de la "Clase A" resultaría de la elección del método de explotación de hundimiento por bloques ("Block Caving") sin una certidumbre suficiente de la "hundibilidad" del macizo rocoso, podría resultar en una infravaloración de gran magnitud en los parámetros de ley y coste, e incluso ser causa de inviabilidad económica. (Guzman, R. Sanchez, F. and Botin, J.A. 2014) proponen un modelo estocástico para la cuantificación y gestión del riesgo asociado a los parámetros de hundibilidad y fragmentación natural en diseño del método de explotación de "Block Caving". Asimismo, (Botin J.A., et al, 2015) proponen una metodología basada en simula-

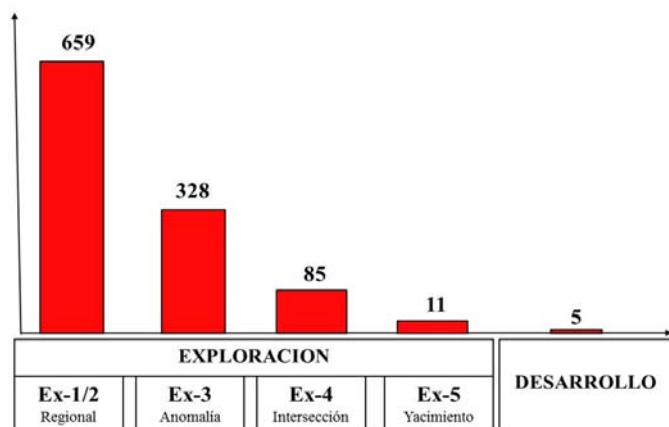


Figura 3. Numero de proyectos mineros en fase de inversión por cada 1000 que inician exploración.

Figure 3. Number of mining projects in an investment phase, for 1,000 starting exploration.

ción condicional que permite cuantificar el riesgo asociado a la incertidumbre en la ley del Yacimiento.

Los riesgos de las clases "B" y "C", de bajo impacto económico, resultan de incertidumbres en los parámetros de diseño e ingeniería del Proyecto, generalmente debidos a defectos o limitaciones de alcance en los estudios, pruebas y ensayos. Por ejemplo, un ejemplo de "Clase B", se genera cuando la ingeniería de proceso no está soportada por ensayos fiables y, como resultado, los rendimientos resultan inferiores a los previstos, con el consiguiente impacto en el resultado económico del proyecto. El riesgo de Clase "D", son riesgos residuales que resultan de la gestión de los de clase "B" y otros riesgos que permanecen al final de la fase de viabilidad final ya que su impacto económico es inferior al coste de eliminación.

Los riesgos de la "Clase C" se asocian a incertidumbres con potencial de generar impactos de gran magnitud, generalmente asociados a no haber tenido en cuenta el impacto de eventos catastróficos (e.g. terremotos, inundaciones, etc.), en la ingeniería conceptual del proyecto. Los riesgos de este tipo deben gestionarse en la fase de definición del perfil del proyecto mediante el análisis de riesgos, planes de emergencia y cobertura de seguros.

En el libro "Sustainable Management of Mining Operations" (Botin, J.A. 2009), se describe el evento catastrófico de la rotura del dique de estériles de la

mina Aznalcollar, un ejemplo de riesgo de Clase C, que resulto en el cierre definitivo de la operación.

Para que la decisión final de viabilidad sea positiva, el Proyecto debe ser financiable ("bancable"). Para ello el Estudio de Viabilidad Final debe probar que el proyecto cumple el umbral de rentabilidad exigible, con un nivel de riesgo asumible por los inversores potenciales (Bullock, R. L. (2017). En consecuencia, la etapa final del Estudio de Viabilidad debe seguir un proceso metodológico (Figura 3), en el que los elementos de riesgo asociados a cada fase de la cadena de valor del proyecto son identificados, cuantificados y gestionados para que sean asumibles por los inversores (i.e. que estén clasificados como riesgos Clase D en el modelo de la Figura 4).

La metodología MPRM

El modelo MPRM aquí propuesto (Botin, J.A., Guzman, R., and Smith, M., 2011), caracteriza el riesgo mediante una matriz tridimensional P_{ijk} , agrupando los parámetros de riesgo en procesos y subprocesos de la cadena de valor del proyecto (Figura 6). En este marco metodológico, cada parámetro de la matriz de riesgo P_{ijk} es caracterizado individualmente y, de ser significativo, cuantificado. Además, MPRM emplea el criterio impacto-probabilidad en la etapa de diagnóstico y gestión de riesgo y optimización de la Figura 5.

La Figura 6 representa una cadena de valor típica del estudio de viabilidad de los proyectos mineros, desde la evaluación del yacimiento hasta la decisión final de viabilidad.

La Figura 7 es una síntesis grafica del modelo metodológico MPRM, caracterizado por su foco en la identificación y cuantificación de las fuentes de incer-

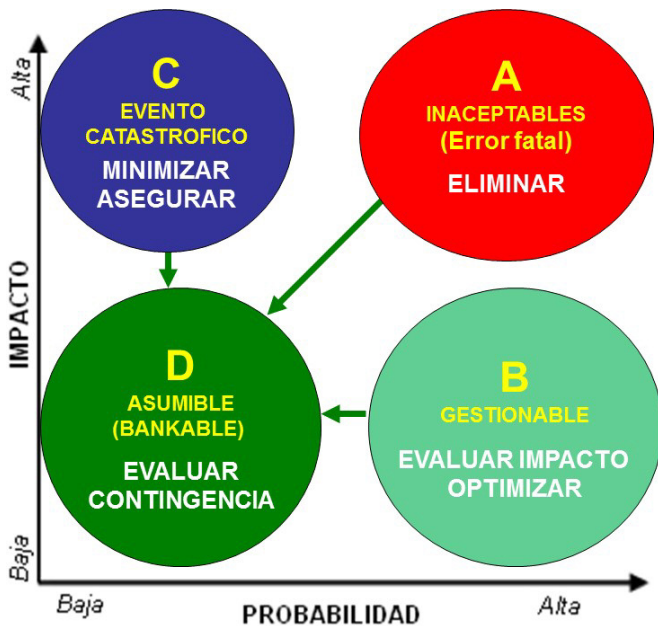


Figura 4. Modelo general de gestión de riesgo de proyecto.
Figure 4. A general project risk management model.

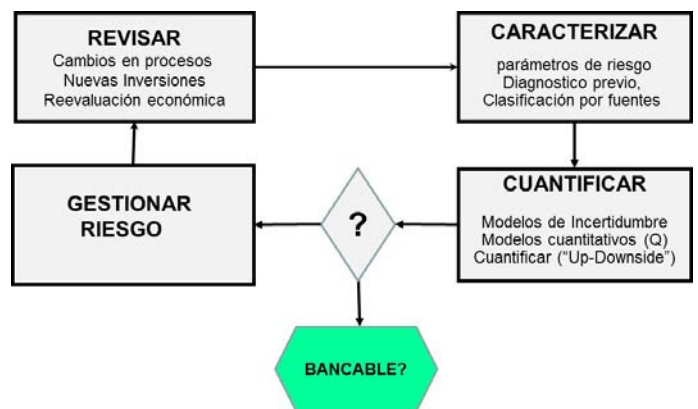


Figura 5. La Gestión de Riesgo en los Estudios de Viabilidad Final.
Figure 5. Risk management in final feasibility studies.

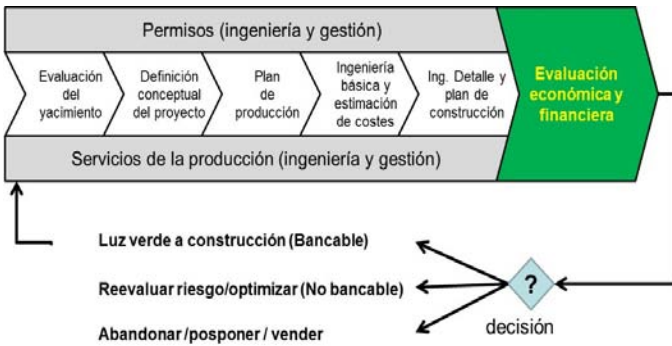


Figura 6. Cadena de valor típica para el estudio de viabilidad del proyecto minero.

Figure 6. A typical value chain for a mine project feasibility study.

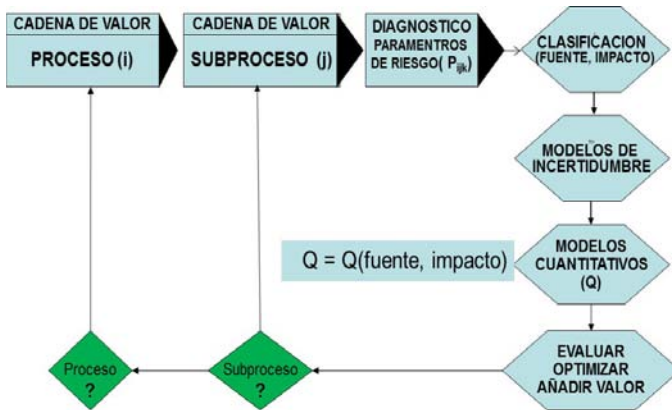


Figura 7. El modelo metodológico MPRM.

Figure 7. The MPRM Methodological Model.

tidumbre en cada proceso y subproceso de la cadena de valor del proyecto.

La matriz de riesgos

Un aspecto clave del modelo MPRM (Figura 7) es la caracterización de la incertidumbre y el riesgo en una matriz tridimensional (P_{ijk}), en la que parámetro de riesgo P_{ij} representa el riesgo asociado a un proceso (i), un subproceso (j) de la cadena de valor del proyecto, que puede ser subdividido en varias fuentes de incertidumbre (k). El foco de MPRM es evaluar el potencial de cada parámetro de riesgo (P_{ijk}) para restar o añadir valor al proyecto y, en consecuencia, a la optimización y la asignación eficiente de los recursos de capital a los procesos con mayor potencial de añadir valor al proyecto. El diagnóstico previo del riesgo

suele requerir la participación de expertos en la evaluación cualitativa de riesgos en cada proceso.

Como ejemplo de ésta la metodología, hemos elegido del proceso "Evaluación del yacimiento," el primero en la cadena de valor del proyecto. La Figura 8 presenta un esquema general de la etapa de caracterización de riesgos en la que el proceso se subdivide en ocho subprocesos y se realiza el diagnóstico de riesgo mediante el análisis de experto de los aspectos clave de incertidumbre.

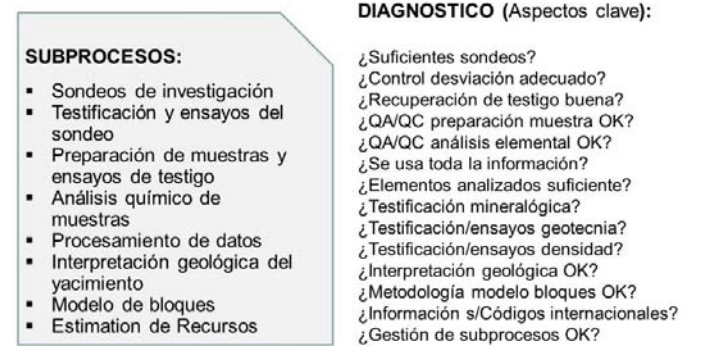


Figura 8. Caracterización MPRM del proceso de evaluación del yacimiento.

Figure 8. MPRM characterization of the orebody evaluation process.

En el modelo matricial de riesgo "P_{ijk}" el riesgo asociado a un subproceso (i, j), resulta de k posibles fuentes de riesgo (incertidumbres y peligros). En la Figura 9, se esquematiza el proceso de caracterización de parámetros de riesgo y fuentes de incertidumbre para el subproceso "Testificación y Ensayos". El resultado final de este proceso se resume en la tabla de la Figura 10 en el que se especifican los parámetros y fuentes de incertidumbre más significativos del subproceso del ejemplo. Los parámetros seleccionados en las tablas riesgo-incertidumbre de la Figura 10, han sido elegidos por expertos como aquellos que contienen la mayor parte del potencial de añadir/restar valor en el subproceso "Testificación y Ensayos" y, por tanto, deben ser objeto de modelización cuantitativa. Los parámetros no incluidos en la tabla riesgo-incertidumbre serian de escaso o nulo nivel de riesgo y, por tanto, serian gestionados como riesgos de la Clase D (Figura 4), mediante la inclusión de una contingencia adecuada en la estimación de costes de capital y operación.

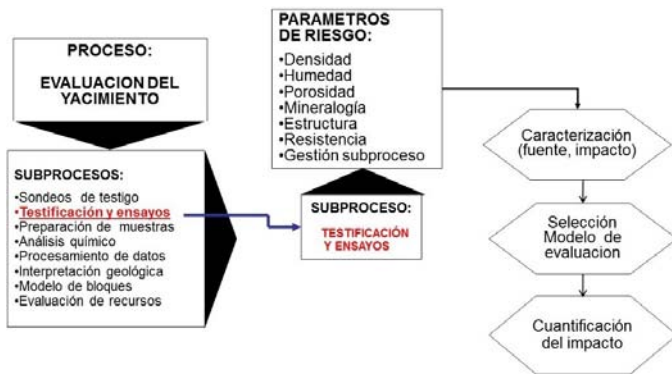


Figura 9. Caracterización de riesgo en el subproceso “testificación y ensayos”.
Figure 9. Risk characterization in the “hole logging and testing” sub-process.

Quantificación del riesgo

La elección de modelos para la cuantificación (modelo Q en la Figura 7), depende principalmente del origen o fuente de incertidumbre y del impacto económico potencial (Figura 10).

La gran mayoría de los riesgos en un proyecto minero son de las Clases B y D de la Figura 4. Son riesgos derivados de incertidumbres en el valor de parámetros técnicos de la ingeniería básica del proyecto (e.g., geotécnicos, metalúrgicos, etc.), de parámetros económicos (e.g. precio, tipo de cambio.) o de tipo medioambiental, sociales y político (e.g., gestión de permisos, licencia social, etc.), y otros parámetros de riesgo “aguas abajo” en la cadena de valor (e.g. Construcción, operaciones, cierre...). El impacto económico (positivo o negativo) de éstos parámetro se puede cuantificar en base al principio de utilidad esperada (“Expected utility”), como diferencia entre

la utilidad esperada (VAN) en el escenario más probable (caso base) y un escenario sin riesgo, considerando como escenario sin riesgo, aquel cuya probabilidad de generar un VAN inferior al previsto es suficientemente baja como para ser asumible por los inversores. En este caso, el potencial de optimización se estima como diferencia entre el impacto económico estimado a partir del modelo de incertidumbre y el coste de reducción del riesgo a valores asumibles por el inversor (e.g. convertir el riesgo clase B a clase D de la Figura 4). Los modelos cuantitativos (Q) más usados para riesgos tipo B, se basan en herramientas estadísticas y simulación estocástica (árboles de decisión y Monte Carlo), combinados con paquetes comerciales de optimización global (“global optimizers”), Opciones Reales, programación lineal y demás métodos de investigación operativa. Los riesgos se Clase D (e.g. riesgos residuales asumibles por los inversores), se estiman globalmente mediante la mayoración por una contingencia adecuada, de los costes de capital y operación.

Los riesgos de las Clases A y C (Figura 4), de alto impacto económico potencial, son riesgos con potencial de ser “killers” (hacer inviable el proyecto), que pueden pasar inadvertidos en el Estudio de Viabilidad final. Por ello, requiere un tratamiento especial, con participación de expertos capaces de detectarlos y caracterizarlos. En general, los posibles “killers” provienen de algún “error fatal” en el modelo de yacimiento y/o el perfil de proyecto, y su identificación requiere de la participación de expertos, preferiblemente externos al proyecto.

Caso de estudio

Este Caso de Estudio está basado en uno de los trabajos de validación de la metodología MPRM (Botin et al., 2015), y fue desarrollado a partir de datos de sondeos facilitados por Minera Gabi (filial de CODELCO), empresa operadora de la Mina Gabriela Mistral, situada a 220 km al Este de Antofagasta (Chile). La mina explota a cielo abierto un yacimiento de pórfidos de cobre con 600 Mill. t de óxidos de cobre con ley media de 0.41% Cu. El proyecto entro en producción en 2010 y en 2012 alcanzo la capacidad de producción de 150,000-170,000 t/año de cobre.

El objetivo es aplicar la metodología MPRM para cuantificar el riesgo asociado a la incertidumbre en el parámetro “ley de cobre”, uno del parámetro de riesgo del subproceso “Evaluación de Recursos” (figura 9). Se ha elegido “ley de cobre” por ser el parámetro al que se asocia la mayor parte del riesgo en el proceso de evaluación del yacimiento. Sin embargo, la

PARAMETRO DE RIESGO (P)	FUENTES DE INCERTIDUMBRE			
	INFORMACIÓN INSUFICIENTE	USO DEFICIENTE DE LA INFORMACIÓN	PRECISIÓN EXACTITUD	REPRESENTATIVIDAD DE LA MUESTRA
Densidad in-situ	X			X
Humedad	X	X	X	X
Porosidad	X			X
Mineralogía		X		
Estructura	X	X	X	X
Resistencia		X		

Figura 10. Tabla incertidumbre-riesgo para el subproceso “testificación y ensayos del sondeo”.
Figure 10. Uncertainty-risk table for “hole logging and testing” sub-process.

metodología y los modelos aquí empleados son igualmente aplicables a cualquier otra variable regionalizada asociada al yacimiento (e.g. leyes de otros elementos, densidad, etc.).

Por facilidad de trabajo, se ha empleado una planificación y un modelo económico simplificados, sin el detalle operacional (equipos, consumos, etc.) pero que satisfacen todas las restricciones operacionales de mina y la planta de tratamiento. Esta simplificación no restringe la validez de la metodología ni las conclusiones.

La base de datos de sondeos usada contiene los datos de 54 sondeos, obtenida de 3,802 muestras de testigo de 3 m de longitud, cada una con los datos de posición, leyes y litología. A efectos de estimación de recursos, los datos están clasificados en los tres grupos litológicos de la Tabla 1.

Modelo de simulación condicional

El modelo de incertidumbre P (Figura 7) se basa en la simulación condicional. Partiendo de la base de datos de sondeos se realizó un modelo de variograma esférico para cada grupo litológico, previamente transformados a la distribución gaussiano estándar (media 0 y varianza 1), obteniéndose un modelo variográfico gaussiano para cada grupo. Los modelos variográficos se emplearon para generar el modelo de bloques del yacimiento. En este Caso, se realizaron dos modelos de bloques independientes, uno para cada una de las dos zonas del yacimiento, una de ellas con mucha menos densidad de datos, lo que permite mejorar la estimación realizada.

Mediante simulación condicional aplicada al modelo de bloques, se han obtenido 100 valores equiprobables de ley de cobre para cada bloque. El modelo fue validado mediante la verificación estadística de que ambos modelos variográficos, el obtenido

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Muestras	2,833	463	255
Mediana	0.456 %	0.561 %	0.700 %
Varianza	0.227	0.228	0.511
Desv. Típica	0.476 %	0.478 %	0.715 %
Mediana	0.331 %	0.389 %	0.476 %
Maximo	5.74 %	2.96 %	6208%

Tabla 1. Estadística de grupos litológicos.
Table 1. Statistics of the lithological groups.

a partir de la simulación condicional de bloques unitarios y el obtenido del modelo de bloques original, son idénticos y ambos son representativos de los variogramas experimentales obtenidos a partir de los datos crudos no gaussianos de la base de datos de sondeos.

Diseño de cortas y plan de producción

La corta límite máximo y cortas anidadas del plan de producción se han diseñado por el método convencional de Lerch y Grossman [42]. La corta límite máximo se diseñó a partir del precio de cobre del caso base (Tabla 2). Las cortas anidadas, se diseñan a partir de valores reducidos de precio de cobre obtenidos de aplicar factores de precio o "Revenue Factors" entre 0,3 a 1,02 obteniéndose un total de 37 cortas anidadas.

El gráfico de la Figura 11 representa mediante barras de color las 37 cortas anidadas ordenadas por el VAN (Valor Actual Neto) obtenido de actualizar a la tasa del caso base (10%) el valor del cobre vendible contenido en cada una de ellas para el "mejor" y el "peor" caso resultante de la simulación condicional. La corta de color rojo (corta 36) corresponde a la de mayor VAN para el "Mejor caso". La corta de color amarillo (corta 21) corresponde al de mayor VAN para el "Peor caso". La corta de color azul oscuro (corta 17) corresponde al inicio la caída de la tendencia creciente en el VAN y la corta de color azul claro (corta 14) corresponde al comienzo de la diferenciación en VAN entre el "Mejor caso" y el "Peor caso".

En la Figura 12 se representa gráficamente las diferencias porcentuales, en VAN, tonelaje extraído, tonelaje enviado a planta y cobre recuperado, entre la

Parámetros	Unidad	Valor
Precio del mineral	USD/lb	2,5
Costo de venta	USD/lb	0,25
Costo de proceso	USD/t	5,07
Costo de mina	USD/t	2,27
Recuperación de metal	%	82
Ángulo de talud global	°	48
Densidad	t/m ³	2,4
Tasa de descuento	%	10
Ritmo de extracción anual	t/año	70.920.000
Ritmo de alimentación a planta	t/año	45.000.000
Inversión	USD'Mill.	770

Tabla 2. Parámetros de diseño de corta. Caso Base.
Table 2. Pit design parameters. Base Case.

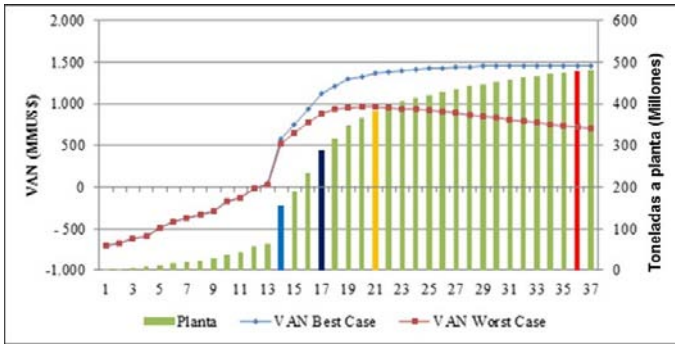


Figura 11. VAN y tonelaje a planta para cada corta anidada.
Figure 11. NPV and tonnage to plant for each nested pit.

corta de VAN máximo (corta 36) y las otras tres pre-seleccionadas (14, 17 y 21), marcadas en color en la Figura 11.

Del análisis realizado, se concluye que la corta final económicamente más favorable (Mayor TIR) es la corta 21, que con un VAN 6,5% inferior al VAN la corta máxima (corta 36), permite extraer el 80% del mineral, con una reducción del tiempo de explotación del 30%. En conclusión, la corta 21 se elige corta límite económico.

El proceso de planificación de largo plazo de la corta límite elegida (corta 21), comienza con la integración de las 21 cortas anidadas interiores a la corta 21, en fases operacionales. Para ello se empleó el software “Vulcan” de Maptek (<https://www.maptek.com/>), obteniéndose una secuencia en 5 fases operacionales. En la Figura 13 se presentan los datos numéricos y un gráfico de las fases de la secuencia de explotación elegida. La fase 1 corresponde al sólido más interno, tiene una ratio E/M de 0,47, mientras que

Fase	corta final de fase	Material extraído (t)	Mineral a a planta (t)	Ratio E/M
1	12	84.000.046	57.276.655	0,47
2	14	135.681.480	98.900.028	0,41
3	16	131.206.003	77.862.449	0,69
4	18	130.532.407	83.092.133	0,57
5	21	110.779.423	66.017.268	0,68

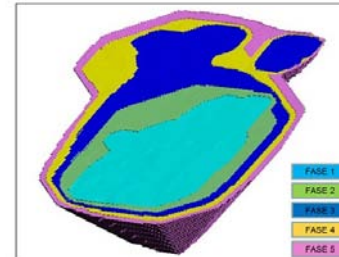


Figura 13. Secuencia de explotación por fases.
Figure 13. Mining sequence by phases.

la fase 5, la más externa, la ratio es de 0,68. La ley media de fase resulta de asignar a cada bloque unitario del modelo de bloques la ley promedio de las 100 simulaciones.

Modelo económico

A partir de las fases operacionales (Figura 13), usando el software “Vulcan”, se preparó un plan de explotación por bloques trimestrales que se resume gráficamente en la Figura 14. Como se explica anteriormente, para la estimación de la ley de cada bloque trimestral, se creó un modelo probabilístico log-normal de cada bloque, a partir de 100 datos de ley obtenidos en la simulación condicional. Para discriminar entre mineral y estéril se aplicó una ley de

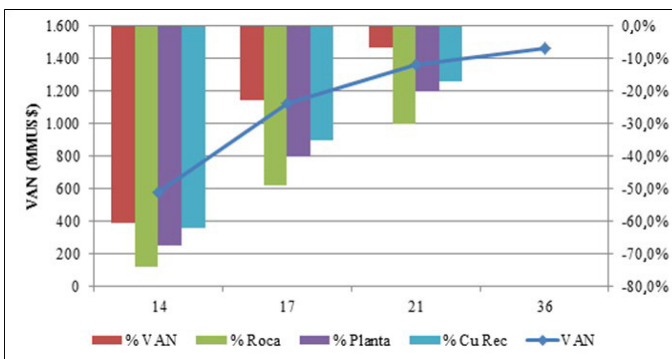


Figura 12. Diferencias en VAN y tonelajes relativas a la corta de VAN máximo.
Figure 12. Differential NPV and tonnages relative to maximum NPV Pit.

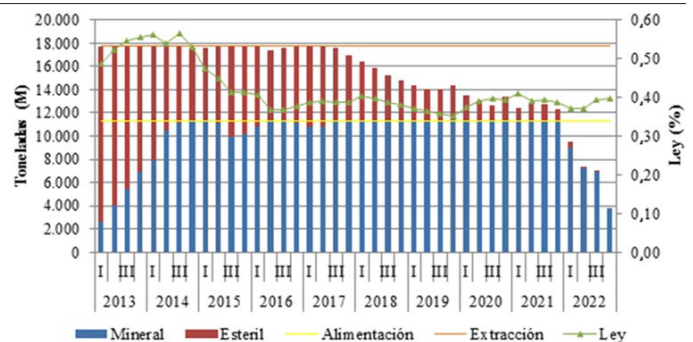


Figura 14. Plan de producción por trimestres.
Figure 14. Production plan by quarters.

corte única de 0,162% Cu, calculada a partir del caso base de la Tabla 2.

La Figura 14 presenta los principales parámetros del plan trimestral obtenido. Estos son: Mineral y estéril extraído, total extracción, alimentación a planta y ley.

A partir del plan trimestral se calcularon los costes de capital y operación y demás parámetros económicos trimestrales y se generó un modelo o "caso base" de flujo de caja del proyecto. Este modelo se resume en la Tabla 3. Se aplicó una tasa de descuento del 2,41% trimestral, equivalente a un 10% anual, resultando un VAN de USD 1021 millones.

(cifras en Miles USD)

AÑO	Inversión de capital	Ingresos Netos	Coste Operación	Flujo de Caja Neto
2012	883,23			-883,23
2013	3,992	414,751	269,895	140,864
2014	3,992	909,618	380,418	525,208
2015	3,992	759,112	389,094	366,026
2016	3,992	688,128	398,399	285,737
2017	3,992	694,573	395,325	295,256
2018	3,992	717,913	382,342	331,579
2019	3,992	661,332	370,106	287,234
2020	3,992	711,396	360,919	346,485
2021	3,992	724,589	355,205	365,392
2022	3,992	416,701	212,148	200,561

Tabla 3. Modelo de flujo de caja Caso Base.

Table 3. Cash flow model. Base case.

Modelo de gestión de riesgo

El modelo de gestión de riesgo se basa en el principio de utilidad esperada ("Expected utility"). En base a este principio, el riesgo se cuantifica por diferencia entre las utilidades esperadas (VAN) para el escenario más probable (caso base) y el escenario sin riesgo. El escenario sin riesgo es aquel valor de VAN cuya probabilidad de no ser alcanzado es suficientemente baja como para ser asumible por los inversores.

El modelo de riesgo para la ley del bloque trimestral se basa en una función probabilística log normal ajustada mediante el software EASYFIT a partir de los 100 valores de ley trimestral obtenidos a partir de las 100 simulaciones condicionales de los bloques unitarios explotados en el trimestre considerado. El modelo log-normal es el más empleado en yacimientos de pórfidos de cobre y ha generado un ajuste aceptable de los datos del Caso de Estudio.

Una vez ajustado éste modelo log-normal de leyes

$g(y)$, el escenario "sin riesgo" de ley se define mediante la elección de un percentil de corte en la función acumulada $G(y)$. Así, la elección del percentil 10, significa que la ley y "sin riesgo" para el trimestre considerado es tal que $G(y)=0,1$. La aplicación de la ley "sin riesgo" al cálculo del VAN trimestral, permite definir el VAN "sin riesgo", y por diferencia con el VAN del "caso base", obtener una estimación cuantitativa del "riesgo".

La Figura 15 presenta las leyes resultantes de elegir los percentiles 5, 10 y 15 como escenarios "sin riesgo" en las distribuciones de ley trimestrales. Estos tres percentiles corresponderían a tres niveles de tolerancia al riesgo en el plan de producción del proyecto. Las leyes del "Caso Base" se calculan a partir del percentil 50, por ser un nivel medio de tolerancia al riesgo. En la Tabla 4 se han resumido los resultados económicos resultantes de calcular el VAN y el TIR para el Caso Base (percentil 50) y los tres escenarios "Sin Riesgo" considerados (percentiles 5, 10 y 15), así como el VAN y TIR diferenciales en cada caso.

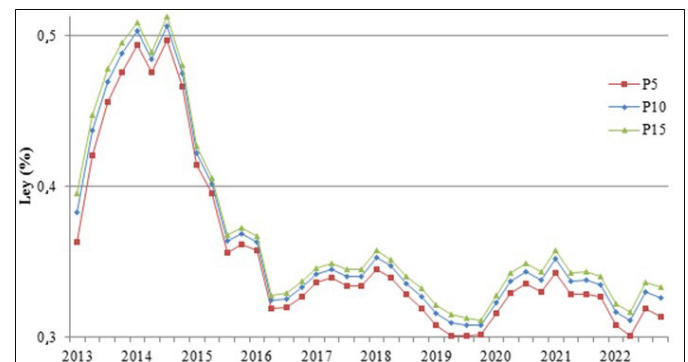


Figura 15. Leyes trimestrales para tres escenarios de tolerancia al riesgo.

Figure 15. Quarterly grades for three risk tolerance scenarios.

En el presente análisis, optamos por definir como escenario "Sin Riesgo" en base a un nivel de tolerancia al riesgo equivalente al percentil 5. Este escenario "Sin Riesgo" reduce el VAN del proyecto desde 1.014 mill. USD a 655 mill. USD (un 25.41%), reduce la ley media desde 0.419% a 0.379%, (un 9.55%). En consecuencia, el riesgo en Ley se ha estimado en 359.2 Mill. USD.

Este resultado indica que, para eliminar el riesgo asociado a la incertidumbre en la Ley de cobre, habría que reducir el VAN esperado en 359 Mill. USD. Asimismo, el resultado puede interpretarse como la

Escenario	VAN (k-USD)	TIR	VAN Diferencia	Ley media
Caso Base	1,014,267	7.38%	-	0.419%
Percentil 5	655,065	5.88%	-359,202	0.379%
Percentil 10	731,32	6.21%	-282,946	0.387%
Percentil 15	778,639	6.42%	-235,628	0.393%

Tabla 4. Caso Base vs. Escenarios de tolerancia al riesgo.

Table 4. Base case vs. risk tolerance scenario.

mejor estimación de la inversión máxima aplicable a reducir la incertidumbre en la ley mediante la perforación de más sondeos de investigación. En cualquier caso, el caso de estudio confirma la validez de la metodología MPRM como una herramienta útil para la cuantificación y gestión del riesgo.

Conclusiones

Las decisiones de inversión en minería se caracterizan por la elevada incertidumbre con relación a parámetros intrínsecos y extrínsecos al proyecto que influyen sobre las expectativas de rentabilidad. En este contexto, MPRM es una metodología integrada para la gestión de riesgo y optimización en la toma de decisiones en todas las fases del proceso de inversión en minera. El aspecto clave en MPRM es un planteamiento global y una visión integrada en la cadena de valor, que plantea la gestión de riesgo y optimización como dos partes de un único proceso. En MPRM el riesgo es caracterizado mediante un modelo matricial tridimensional, en el que el riesgo y el potencial de valor añadido son evaluados para cada parámetro de riesgo (P_{ijk}), asociado a un proceso (i), un subproceso (j) y una fuente u origen (k) de la cadena de valor del proyecto. En consecuencia, esta metodología facilita el proceso de optimización y la asignación eficiente de los recursos de capital a los procesos con mayor potencial de añadir valor al proyecto.

Como una metodológica integral para la cuantificación del riesgo y la optimización del valor añadido en un proyecto minero, MPRM es útil como herramienta de apoyo a la dirección en la toma de decisiones que impliquen la caracterización previa de escenarios de inversión.

En las fases de exploración y desarrollo del proyecto, uno de los problemas más importantes en la gestión económica de la empresa minera, es la distribución óptima de los recursos financieros disponibles entre los proyectos de exploración y desarrollo a considerar en el presupuesto de inversión. MPRM

permite resolver este problema mediante la determinación de ratios de eficiencia en la inversión, estimados como cociente entre el "valor en riesgo" y el "coste de eliminación" para los parámetros de riesgo P, más significativos. Con este criterio, el máximo rendimiento de la inversión se obtiene asignando prioridad a los proyectos con ratio de eficiencia más elevado.

MPRM es igualmente aplicable en la fase de viabilidad final de un proyecto minero. En este caso, el problema que se plantea es determinar un criterio eficiente para determinar el alcance de los estudios y trabajos de campo a realizarse para alcanzar la "Bancabilidad" es decir, la reducción del riesgo a niveles asumible por el inversor. Este objetivo suele requerir la asignación de importantes inversiones a la reducción de la incertidumbre en la ley de mineral, la investigación del macizo rocoso, el estudio del proceso mineralúrgico, los impactos ambientales, licencia social y otros factores de riesgo del proyecto.

MPRM es asimismo útil como herramienta de apoyo en la fase de "Due diligence" de los procesos de fusiones y adquisiciones de activos mineros. En estos casos, el problema que se plantea es la caracterización de los parámetros de riesgo críticos y la determinación de un valor del activo, para un escenario de riesgo asumible por el inversor.

Agradecimientos

Deseo expresar mi reconocimiento a los profesores Ronald Guzman y Martin Smith y a los alumnos de máster Francisco Valenzuela, Felipe Sanchez y Fernanda del Castillo, por su participación como investigadores y coautores en las publicaciones en la que se basa parte de este artículo, todos ellos miembros del Grupo de Investigación Codelco, en la Pontificia Universidad Católica de Chile, que me honré en dirigir desde 2011 a 2016. Asimismo, estoy agradecido a la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, la casa de estudios que albergo el Grupo de Investigación y a la empresa Codelco Chile, por el auspicio económico y apoyo técnico al Grupo de Investigación.

Referencias

- AACE International Recommended Practice No. 18R-97. Cost Estimate Classification System as Applied in Engineering, *Procurement and Construction for the Process Industries*. www.aacei.org. March 1, 2016.
- Botin, J.A. 2009. An Overview of the Aznalcollar Tailings

- Dam Failure. "Sustainable Management of Mining Operations": *The Society for Mining, Metallurgy and Exploration*. Littleton, Colorado, USA... Pp 348-356.
- Botín J.A, Guzman, R. and Smith, M. 2011. A methodological model to assist in the optimization and risk management of mining investment decisions. *Dyna*, 78(170), 221-226.
- Botin J.A, Del Castillo, M.F and Guzman, R. 2013. A Real Option Application to Manage Risk Related to Intrinsic Variables of a Mine Plan: A case Study on Chuquicamata Underground Mining Project. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Vol. 113. July 2013. Pp. 583.
- Botin J.A., Guzman R., Valenzuela F. and Monreal C. 2015. A methodology for the management of risk related to uncertainty on the grade of the ore resources. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(1), 19-23.
- Bullock, R. L. (2017). Phased Approach to Mineral Property Feasibility Study and Economic Analysis. *Mineral Property Evaluation: Handbook for Feasibility Studies and Due Diligence*, 279.
- Eggert, R. G. (2010, May). Mineral exploration and development: risk and reward. In *International Conference on Mining*, Phnom Penh, Cambodia (Vol. 26).
- Guj, P. and Garzon, R. 2007. Modern Asset Pricing — A Valuable Real Option Complement to Discounted Cash Flow Modelling of Mining Projects, *Project Evaluation Conference*, Melbourne, Australia.
- Guzman, R. Sanchez, F. and Botin, J.A. 2014. A Methodological Model to Manage Financial Risk Associated to Uncertainty on Rock Mass Caveability and Ore Fragmentation in the Design of Block Caving Mining Methods. Preprints of the *2014 annual SME Meeting*. The Society for Mining, Metallurgy and Exploration. Littleton, Colorado, USA.
- Hebblewhite B.K. 2007. *Management of geotechnical risks in mining projects*, School of Mining Engineering, The University of New South Wales, Sydney NSW, Australia.
- Li, S., Dimitrakopoulos, R., Scott, J. and Dunn, D. 2004. Quantification of Geologic Uncertainty and Risk Using Stochastic Simulation and Applications in the Coal Mining Industry, *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning Congress*, Perth, WA, Australia.
- Morley, A. 2007. Evaluation of Exploration Projects, *Project Evaluation Conference*, Melbourne, Australia.
- Newman, A. M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., & Eureka, K. (2010). A review of operations research in mine planning. *Interfaces*, 40(3), 222-245.
- NRCCanada. (2008). *Canadian Mineral Yearbook: 2006 Review and Outlook*. Ottawa: Minerals and Metals Sector - Natural Resources Canada.
- Samis, M., Martinez, L., Davis, G., and Whyte, J. 2011. Using dynamic DCF and real option methods for economic analysis in NI43-101 Technical Reports. *VALMIN Seminar Series*, Perth, October 2011. Australasian Institute of Mining and Metallurgy. pp. 1–23.
- Snowden, D., Glacken, I. and Noppe, M. 2002. Dealing with Demands of Technical Variability and Uncertainty along the Mine Value Chain, *Value Tracking Symposium*, Brisbane, Australia.
- Vielma, J.P., Espinoza, D and Moreno, E. 2009. Risk control in ultimate pits using conditional simulations, *Proceedings of the APCOM 2009*, pp. 107-114, Vancouver, Canada.
- Whittle, G., Strange, W., and Hanson, N. 2007. Optimizing Project Value and Robustness, *Project Evaluation Conference*, Melbourne, Australia.

Recibido: diciembre 2017

Revisado: febrero 2018

Aceptado: junio 2018

Publicado: marzo 2019