

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



**OPTIMIZAR EL PLAN DE MINADO CONSIDERANDO EL
RIESGO E INCERTIDUMBRE DE LA LEY DEL ORO EN EL
PROYECTO SAN GABRIEL – COMPAÑÍA DE MINAS
BUENAVENTURA S.A.A**

Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Maestro
en Regulación, Gestión y Economía Minera que presenta:

Octavio Benigno Vargas Machuca Bueno

Asesor:

Luis Fernando Gala Soldevilla

Lima, 2024

Informe de Similitud

Yo, LUIS FERNANDO GALA SOLDEVILLA, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de el trabajo de investigación titulado OPTIMIZAR EL PLAN DE MINADO CONSIDERANDO EL RIESGO E INCERTIDUMBRE DE LA LEY DE ORO EN EL PROYECTO SAN GABRIEL – COMPAÑÍA DE MINAS BUENAVENTURA S.A.A., de OCTAVIO BENIGNO VARGAS MACHUCA BUENO, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 11%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 18/06/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de investigación, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 23 de Junio de 2024

Apellidos y nombres del asesor:

GALA SOLDEVILLA LUIS FERNANDO

DNI:
09997663

Firma

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis Fernando Gala Soldevilla', is written over a light blue rectangular background.

ORCID:
0000-0001-6147-5630

Dedicatoria

“A mi esposa Elizabeth Shirley y a mis hijos Mathias y Marcelo, por el amor, paciencia y apoyo incondicional durante el desarrollo de la tesis.

A mis padres por el ejemplo de esfuerzo y superación.

A Tantita, mi querida abuela, que aún tengo la dicha de tenerla a mi lado con sus 88 años”

Octavio



Agradecimientos

A Juan Carlos Salazar, vicepresidente de Geología y Exploraciones de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A, por permitirme emplear la información del Proyecto San Gabriel.

A José Enrique Gutiérrez, director de Modelamiento y Recursos Minerales, por la enseñanza y guía para el desarrollo de esta tesis. Muchas gracias, amigo Kike.

A mis asesores los profesores Fernando Gala y Emilio Gómez de la Torre, por su disposición en la elaboración de la tesis, en base a sus experiencias y la sapiencia para direccionar mis conocimientos.



Índice

Índice	v
Lista de tablas.....	vii
Lista de figuras	viii
Lista de anexos.....	ix
Resumen	10
Introducción	12
Antecedentes del caso de Estudio	14
Tema	15
Problema de Investigación	16
Hipótesis	17
Objetivo	18
Objetivo Principal.....	18
Objetivos Específicos:.....	18
Propuesta de enfoque metodológico	18
CAPÍTULO I: Estado del Arte y Marco teórico	19
1.1. Proyecto Minero	19
1.2. Modelamiento geológico del Yacimiento	24
1.3. Estimación de Recursos	30
1.4. Valor Presente Neto (VPN)	42
1.5. Planeamiento Estratégico Minero	44
1.6. Gestión de Riesgo	46
1.7. Incertidumbre y riesgo en minería	48
1.8. Marco Teórico	65
CAPÍTULO II: DESARROLLO DEL PROBLEMA– MINA SUBTERRÁNEA	71
2.1. Geología del proyecto de estudio	71
2.2. Validación y estudio exploratorio	73
2.3. Modelo de simulación condicional	79
2.4. Análisis de riesgo e incertidumbre para la Ley de Oro	83
2.5. Resultados	86
CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	91
3.1. Análisis de los Resultados	91
3.2. Malla óptima de perforación	92
Conclusiones	97

Recomendaciones	99
Bibliografía.....	100
anexos	103



Lista de tablas

Tabla 1: Incertidumbres técnicas más comunes	52
Tabla 2: Incertidumbre externa de los proyectos mineros	52
Tabla 3: Procedimiento de cálculo del VaR paramétrico	63
Tabla 4: Base de Datos utilizada	74
Tabla 5: Códigos por zonas	74
Tabla 6: Base de datos	80
Tabla 7: Decluster	81
Tabla 8: Variograma y plan de estimación	81
Tabla 9: Resumen de Datos del Software Supervisor	85
Tabla 10: Plan de Minado considerando las Onzas de Au por año	85
Tabla 11: Resumen de PVaR por año	88
Tabla 12: Plan de Minado actual	88
Tabla 13: Plan de minado considerando el análisis del riesgo	88



Lista de figuras

Ilustración 1: Etapas de un proyecto minero	19
Ilustración 2: Técnicas utilizadas en la prospección	20
Ilustración 3: Comparación entre los tipos de modelos	27
Ilustración 4: Diagrama de Flujo de Modelamiento	28
Ilustración 5: Distribución de ley original (Z) vs. distribución ley estimada (Z*)	40
Ilustración 6: Ejemplo de transformación gaussiana de datos	41
Ilustración 7: Etapa de proyecto con incertidumbre	50
Ilustración 8: Visión con opciones reales	51
Ilustración 9: Formulación del VaR	60
Ilustración 10: Diagrama del proceso de la metodología	63
Ilustración 11: Diagrama del Método de Incertidumbre	65
Ilustración 12: Desagrupamiento de ley	66
Ilustración 13: Trayectoria de Simulación	67
Ilustración 14: Validación de la simulación, variografía original vs. simulados	68
Ilustración 15: Plano estructural	71
Ilustración 16: Sección geológico y económico	73
Ilustración 17: Dominios de Oro en las dos zonas	75
Ilustración 18: Histograma de Au (g/t) dominio Norte	76
Ilustración 19: Histograma de Au (g/t) dominio Sur	77
Ilustración 20: Variograma de Au del dominio Norte	78
Ilustración 21: Variograma de Au del dominio Sur	78
Ilustración 22: Vista del Yupay -SIM para Testear	80
Ilustración 23: Validaciones de la simulación antes de correr los 60 escenarios: Validación entre la variografía kriging ordinario Vs Simulaciones (direcciones Az:0, pl:0; Az:45, pl:90; Az:90, pl:0)	82
Ilustración 24: Título Vista del Yupay -SIM para Simulación (60 escenarios) ..	83
Ilustración 25: Histograma del año 01	84
Ilustración 26: Valor seguro (safe value) al 95%	84
Ilustración 27: Histograma y Variables a Considerar	86
Ilustración 28: Curva Probabilística del primer año	87
Ilustración 29: Comparación de simulación 13,30 y 50 vs Kriging Ordinario (KO)	93
Ilustración 30: Vista del Yupay para malla de Optima de Sondajes	94
Ilustración 31: Análisis a diferentes mallas	95

Lista de anexos

Plan de Minado y excavación	104
Análisis año 01:	105
Análisis año 02:	106
Análisis año 03:	107
Análisis año 04:	108
Análisis año 05:	109
Cálculo de riesgo	110
Valorización conceptual	110
Valorización Conceptual (Payback)	110
Valorización Conceptual (Payback)	111
Presupuesto para mitigar el riesgo	111

Resumen

En la minería actual, uno de los elementos más importantes en la etapa de toma de decisiones es la identificación del riesgo e incertidumbre; sin embargo, las técnicas convencionales de evaluación de riesgos no proporcionan información suficiente ni detallada de estos.

Los grandes proyectos mineros conllevan un riesgo financiero significativo, lo que requiere una metodología de evaluación de riesgos más compleja que considere las fuentes potenciales de incertidumbre. Cabe señalar que, la principal fuente de riesgos inherentes al proceso de inversión minera está relacionada con el proceso de evaluación de depósitos, que es el paso más crucial.

En esta investigación se da un ejemplo de la optimización de un plan de minado tomando en consideración el riesgo y la incertidumbre de la Ley de Oro en los proyectos mineros, así como desarrollar y validar un método para evaluar el riesgo de la variación de la Ley de Au en el plan de minado. La utilización de este modelo es un caso real que involucra un yacimiento de oro, la geología está conformada por brechas y un sistema de fallas que controlan la mineralización.

Es preciso indicar que, la metodología implementada para este proyecto incluye etapas como: la definición de los dominios más representativos del área de estudio, así como del plan de minado anual de cinco años, entre otras. Asimismo, se pudo determinar una pérdida potencial del 17% que implicaría de US\$ 19.6 MM (US\$ 115.3 MM a US\$ 95.7 MM, en los cinco primeros años). Por lo tanto, al ejecutar la malla de perforación estaría costando US\$ 2.4 MM. Lo que indica que este proyecto es viable.

Palabras clave: Minería, riesgo, incertidumbre, optimización, Ley de Oro, proyecto minero

Abstract

In current mining, one of the most important elements in the decision-making stage is the identification of risk and uncertainty; However, conventional risk assessment techniques do not provide sufficient or detailed risk information.

Large mining projects carry significant financial risk, requiring a more complex risk assessment methodology that considers potential sources of uncertainty. It should be noted that the main source of risks inherent in the mining investment process is related to the deposit evaluation process, which is the most crucial step.

This research gives an example of the optimization of a mining plan taking into consideration the risk and uncertainty of the Gold Grade in mining projects, as well as developing and validating a method to evaluate the risk of variation in the Grade. of Au in the mining plan. The use of this model is a real case that involves a gold deposit, the geology is made up of breccia and a system of faults that control mineralization.

It is necessary to indicate that the methodology implemented for this project includes stages such as: the definition of the most representative domains of the study area, as well as the five-year annual mining plan, among others. Likewise, a potential loss of 17% can be determined, which would imply US\$ 19.6 MM (US\$ 115.3 MM to US\$ 95.7 MM, in the first five years). Therefore, when executing the drilling mesh it would cost US\$ 2.4 MM. Which indicates that this project is viable.

Keywords: Mining, risk, uncertainty, optimization, Gold Law, mining project.

Introducción

La presente investigación se refiere al tema de cuantificar el riesgo e incertidumbre de la Ley del Oro dentro de un plan de minado, que se puede definir como el riesgo que las empresas mineras deben considerar al momento de invertir en la continuidad de un proyecto. Por ello, dentro de las características principales de estos proyectos, está la de involucrar montos grandes y largos periodos de inversión, además su viabilidad involucra el riesgo e incertidumbre principalmente en las diferentes áreas como: seguridad, geología, minas, planeamiento, procesos (planta) y finanzas. Estos proyectos normalmente se evalúan utilizando un flujo de caja que incorpora el valor del mineral y convierte el efectivo de los flujos anuales al valor presente neto.

Para analizar esta problemática es necesario mencionar una de sus causas: la sensibilidad de la Ley del Oro; sin embargo, hay que precisar que, también existe la variabilidad en el precio del oro, pero en este caso será constante.

Dicha sensibilidad se entiende como la variabilidad que se presenta en los diferentes tipos de yacimientos de oro, por ejemplo, en la industria minera, las leyes en los depósitos están distribuidas a través de métodos tradicionales (inverso de la distancia y vecino más cercano) o métodos geoestadísticos (kriging ordinario y simple); con estos métodos se obtienen un único valor por celda o bloque, el mejor valor promedio y sobre todo son los métodos más usados en la industria. En el Perú, la mayoría de las empresas mineras- incluyendo compañía de minas Buenaventura- viene elaborando el plan de minado en la forma tradicional.

En el ámbito profesional- como geólogo de Recursos Minerales- el interés es de proponer una metodología para cuantificar el riesgo dentro del plan de minado, utilizando la simulación condicional que permitiría generar varios escenarios de leyes teniendo como base las leyes que se utilizan para la estimación de recursos.

La presente investigación toma como referencia a tres autores que manifiestan la importancia del análisis de riesgo e incertidumbre: Valenzuela Saintard, 2013, quien describe todos los riesgos que se hay en las etapas o procesos (perforación diamantina, logueo y muestreo, preparación de muestras, análisis químico, administración de base de datos, interpretación y modelamiento geológico, estimación de recursos) hasta calcular las reservas minerales y finalmente, un plan de minado en un proyecto de inversión.; mientras que Munizaga Rosas, 2018, hace mención que existe una metodología para determinar el riesgo de una variable considerando un objetivo (VaR) y Gutiérrez Ramírez, 2022, quien considera tres variables (ley, densidad y volumen o geometría de la mineralización) que impactan directamente al tonelaje. Además, hace el análisis de riesgo e incertidumbre de cada uno y el impacto que se tendrá en el VPN.

Para la presente investigación se toma en consideración el tema: “Optimizar el plan de minado considerando el riesgo e incertidumbre de la Ley del Oro en el proyecto San Gabriel – Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.”. Para evitar el impacto negativo a la valorización financiera debido al incumplimiento de la producción (cantidad de onzas), es importante considerar la metodología de análisis en riesgo e incertidumbre al momento de elaborar el plan de minado. Considerando dicho análisis para el Au en el plan de minado dentro de los cinco primeros años, se determinó que hay una pérdida (riesgo) del 17% de onzas con respecto al programado. Dicha pérdida potencial implicaría US\$ 19.6 MM en los cinco primeros años.

El estudio ha demostrado que la metodología del valor del riesgo con 5% de confianza (VaR (5%)), como la desviación del VaR y proporción del DVaR en función al objetivo (DVaR (5%) y PVaR (5%) respectivamente), aplicado al plan de minado, nos permitió calcular el riesgo de los cinco (05) primeros años. Donde en el año 03 se tiene un riesgo de 28.2% siendo el más alto, considerando este riesgo en el flujo de caja (VPN) del payback (periodo de recuperación de la inversión) de la empresa se tendría una pérdida de US\$ 7.52 MM a US\$ -24.88 MM.

ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO

Durante años, las compañías mineras fueron viables por la cantidad y ley que presentaba el yacimiento, lo que a su vez se convertía en años de producción o- como se conoce- años de vida de la mina. Debido a los diferentes acontecimientos en el país (20 años), el valor de una mina o proyecto minero no solo se debe medir por la cantidad de recursos: medido, indicado e inferido y reservas: probadas y probables, sino a la aceptación que esta puede tener en la población.

En el Perú, la mayoría de las empresas mineras- incluyendo compañía de minas Buenaventura- vienen elaborando el plan de minado en la forma tradicional. Esto consiste en un tonelaje producto del volumen (stop o tamaño de bloque) por la densidad y la ley o valor de le metal consecuencia de la estimación de recursos minerales (kriging ordinario o inverso a la distancia).

Cada etapa de la planificación minera se completa en una escala de tiempo diferente, con un volumen de datos distintos y con un nivel de certeza disímil. Debido a esto, se hacen esfuerzos durante este proceso para asegurar que los planes mineros producidos puedan llevarse a cabo durante la duración de la mina. Con la intención de minimizar la incertidumbre en el plan de minado, se debería considerar el análisis de riesgo ligado a la incertidumbre que afecta directamente al plan de minado que es comprometido por la Ley de Oro. Esto da como resultado la elaboración de diferentes escenarios de dicha ley que tienen en cuenta las circunstancias únicas de cada proyecto, así como las proyecciones pasadas y futuras.

Los proyectos mineros normalmente se evalúan utilizando un flujo de caja que incorpora el valor del mineral, asimismo, convierte el efectivo de los flujos anuales al valor presente neto. Cabe precisar que, a través del conocimiento de algunas variables importantes relacionadas con el proyecto, por ejemplo: el precio, el valor de mineral, la densidad y toneladas producidas, se evalúa la incertidumbre en el proceso estándar.

Se tiene que tener en cuenta que las tres fuentes más importantes de incertidumbre en la minería son: geológicas, de mercado y operativas, con incertidumbre geológica resultante del uso de métodos geoestadísticos para determinar la ley y las características de la roca utilizando los datos de perforación.

Tema

- ✓ Al elaborar el plan de minado se debe tener en cuenta todos los factores que podrían afectar el cumplimiento del plan dentro de las diferentes áreas: Seguridad, Geología, Minas, Planeamiento, Procesos (planta) y Finanzas. Es preciso indicar que, si se toma en consideración el análisis de riesgo al momento de elaborar un plan de minado, se puede evitar daños a la persona, propiedad, al ambiente y a lo económico.
- ✓ El plan de minado está considerado en el marco legal, dentro del reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, desde su de una primera versión del DS 0024-2016 – EM y después en la modificatoria DS 0024-2016 – EM, en el artículo 34 y anexo 1. Ante la falta de los análisis adecuados en el diseño y plan de minado, se puede tener un bajo desempeño de los colaboradores en temas de seguridad.
- ✓ Se considera el análisis de la variabilidad de la ley de Oro (Au) en la elaboración del plan de minado, además, se podría obtener con anticipación los posibles planes de acción en los diferentes procesos o etapas del minado.

Problema de Investigación

- ✓ Impacto a la valorización financiera de la empresa debido al incumplimiento de la producción (cantidad de onzas de Au) dentro del plan de minado por la sensibilidad de la Ley de Au en un proyecto minero.
- ✓ Las empresas mineras utilizan el plan de minado para generar un flujo de caja (cuanto y cuando van a recuperar lo invertido), y para esto es necesario determinar el riesgo e incertidumbre sino se llegará a cumplir el plan de minado (onzas de Au).
- ✓ ¿Qué análisis debemos considerar en el momento de la elaboración del plan de minado?
 - Variabilidad de la Ley de Au.
 - Densidad.
 - Certeza.
 - Precio del Au.
 - Geometría.
- ✓ ¿Se cumplirá la Ley de Au en plan de minado?
 - Sobre la base del análisis de riesgo del plan de minado.
- ✓ ¿La variabilidad de la densidad en las brechas?
 - Incrementando la toma de muestra para la densidad ayudará a definir el peso específico del mineral.

- ✓ ¿La geometría de la brecha se mantendrá cuando se va a explotar o minar los recursos?
 - La variabilidad está en base a la certeza, a mayor perforación diamantina mejor se define la geometría.

- ✓ ¿Considerar los recursos inferidos en el plan de minado?
 - Por ser recursos inferidos tiene baja confiabilidad.

En el presente trabajo de investigación se va a considerar solo la variación de la Ley de Au y las otras variables será constantes.

Hipótesis

Actualmente, las empresas mineras utilizan el valor del bloque (zona de mineral) que será minado para predecir los pagos a futuro.

Para el presente trabajo se va a considerar como hipótesis, la incorporación del análisis del riesgo e incertidumbre de la Ley Au durante la elaboración del plan de minado lo que ayudará a identificar el sesgo de la variabilidad de las onzas de Oro en diferentes periodos (semanal, mensual, trimestral, semestral y anual) para desarrollar planes de acción antes de iniciar el plan de minado.

¿Incorporando el análisis del riesgo en la variación de la Ley de Au se mejora el plan de minado?

¿Cuál es el riesgo en el plan de minado?

- Aplicar la metodología para cuantificar la variación del Au, considerando una cantidad de simulaciones.
- Para evaluar el riesgo (mayor variabilidad de la ley de Au) se utilizará el VaR (Valor en Riesgo).
- La proporción del DVaR (desviación del VaR) en función del objetivo debe ser menor al 15% (riesgo medio).

Objetivo

Objetivo Principal

- Desarrollar y validar un método para evaluar el riesgo de la variación de la Ley de Au en el plan de minado.

Objetivos Específicos:

- ✓ Proponer una malla de perforación diamantina para minimizar el sesgo de la Ley Au al momento de minar las zonas programadas en el plan de minado.
- ✓ Utilizar la metodología VaR (5%) para cuantificar el riesgo o incertidumbre del plan de minado en un proyecto.
- ✓ Proponer alternativas de mitigación.

Propuesta de enfoque metodológico

La máxima pérdida esperada con respecto a la Ley de Oro dentro del plan de minado se puede definir utilizando la metodología que considera el Valor en Riesgo (VaR) dentro de un verdadero nivel de confianza. La capacidad de este método para la evaluación del impacto de la incertidumbre de las variables pertinentes tanto individualmente como en combinación es quizás su característica más destacada.

- ✓ Una metodología para evaluar la ley de incertidumbre de Au
- ✓ Un análisis del grado de incertidumbre de las variables.
- ✓ Los resultados de las metodologías propuestas, con un análisis de malla óptima.

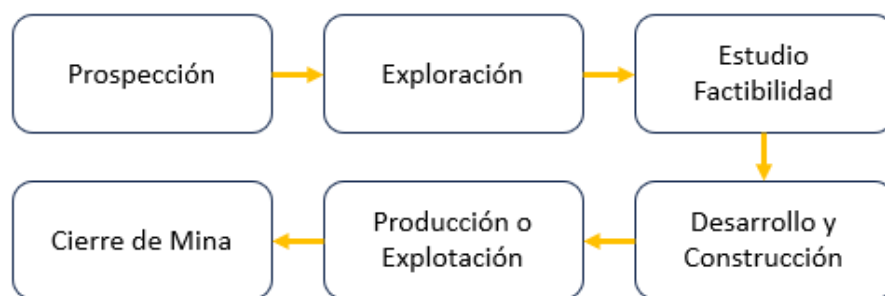
CAPÍTULO I: Estado del Arte y Marco teórico

1.1. Proyecto Minero

Para (Gala, 2020) el proyecto minero es el área de una o varias concesiones mineras continuas, de propiedad de un mismo titular, cuyo objeto sea la realización de actividades encaminadas al descubrimiento, valoración y cuantificación de un yacimiento; y, que realicen diferentes trabajos y labores mineras destinadas a la preparación y desarrollo de un yacimiento, así como la preparación, extracción y transporte de minerales, por consideraciones técnicas, operativas y propias del yacimiento.

Asimismo, para este autor, el proyecto consta de diferentes etapas que demandan capital, tiempo, precisión, rigor y un gran esfuerzo de un equipo humano, responsable que todo salga según lo planificado en cada una estas.

Ilustración 1: Etapas de un proyecto minero



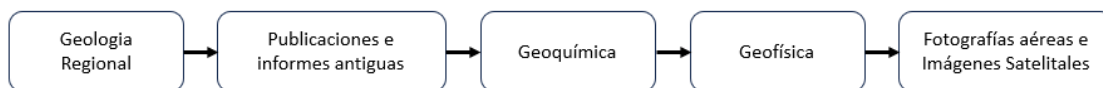
Nota: Elaboración propia.

Prospección:

Localizar anomalías geológicas en la superficie es lo que implica para determinar si allí podría estar presente un depósito mineral. Es factible precisar que, el encontrar anomalías minerales marca el logro de esta etapa.

El depósito mineral encontrado aquí es desconocido en términos de tamaño y valor. En la siguiente figura se muestran las técnicas que se utilizan con más frecuencia:

Ilustración 2: Técnicas utilizadas en la prospección



Nota: Elaboración propia.

Exploración:

Es obtener una comprensión profunda del depósito mineral que se encontró durante la fase de prospección, pero solo dentro de un área geográfica más pequeña. Implica describir las medidas precisas y la zona mineral o económica del depósito mineral, o el valor del depósito. Los modelos geológicos y de recursos de un depósito se producen durante la fase de exploración. Por ello, para decidir si se avanza con el proyecto en este punto, se debe completar un estudio de prefactibilidad.

Cabe indicar que, si este es exitoso, se puede decir que existe un yacimiento y que allí se empieza a definir las reservas minerales. Se conocen algunos factores que influyen, mientras que otros dependen del entorno económico, social y político, que son condiciones exógenas al yacimiento. En esta etapa, obras como:

- Perforación diamantina.
- Muestreos en interior mina y en superficie.
- Cartografiado en detalle.

Evaluación de un proyecto:

El estudio de factibilidad de un proyecto se realiza si los datos anteriores de la exploración son rentables en términos de reservas minerales. Un estudio de viabilidad pasa por estas fases principales:

- Método de minado.
- Producción de la mina.
- Tratamiento de la planta.
- Cálculo de los recursos y reservas.
- Infraestructura.
- Costos de operación y comercialización.
- Viabilidad del proyecto minero.
- Flujo de caja.
- Estudios socioambientales.

Desarrollo y construcción:

La etapa de desarrollo comprende las tareas anteriores que se complementan en la mina para el acceso hasta el mineral desde la superficie y garantizar un suministro constante de este a la instalación de procesamiento. En casi todos los casos, la etapa de construcción se lleva a cabo simultáneamente con el objetivo de establecer la infraestructura necesaria para la extracción, procesamiento, transporte, suministro de energía y acceso vial (carreteras, vías férreas, puertos y aeropuertos) del yacimiento.

Producción:

De acuerdo con las especificaciones descritas en los planes de producción del proyecto, se inicia los procesos principales de esta etapa como lo es, la extracción del mineral desde interior mina o tajo abierto y el transporte a la planta de procesamiento.

Esta etapa se compone principalmente de los siguientes procesos:

- **Minado:** extraer el mineral desde una mina subterránea o tajo abierto.
- **Procesamiento:** consiste en un proceso de chancado de rocas para disminuir el tamaño por medios físicos (contacto entre la roca con bolas de aceros), lo que permite liberar las partículas de metal de la roca y métodos fisicoquímicos para aumentar la concentración de metal.
- **Fundición y/o refinación:** proceso para la separación de los minerales presentes en los diferentes concentrados y la selectividad de los metales fundidos.

Cierre:

El proceso de la ejecución de acciones requeridas (año cero de minado) para restaurar las áreas afectadas por la minería se conoce como cierre de mina. Comenzar desde el final (diseño para cerrar) es la mejor manera de dejar un buen precedente en la industria minera.

En la etapa de evaluación de un proyecto se definen el alcance y la rentabilidad económica mediante dos estudios muy importantes de prefactibilidad y factibilidad. Para esto, se tiene normas específicas para la realización. Por ejemplo:

- JORC Code (2012). El código de Australia para la presentación de informes de resultados de exploración, explotación, recursos y reservas minerales.
- S-K 1300 (sec - usa, 2018). Reemplaza al antiguo IG-7, permite alinear requisitos y políticas del SEC sobre propiedades mineras con estándares regulatorios globales de la industrial actual.
- NI43-101 (2011). El Instrumento Nacional 43-101 es un instrumento

nacional para los Estándares de Divulgación para Proyectos Mineros dentro de Canadá.

Estos estándares describen los pasos y requisitos particulares para conseguir financiamiento en las diferentes bolsas de valores, por ejemplo, en Nueva York, permiten tener una metodología para la presentación sistemática de información sobre un proyecto minero. Si bien deben presentarse en el formato de Ley correspondiente a cada país, los estudios de evaluación económica no están obligados a presentarse conforme a esta normativa.

Un proyecto minero tiene posibilidades de éxito o fracaso al principio, por lo que existen muchas incógnitas. Estas provienen de dos fuentes principales:

- Información Geológica (Base de datos, interpretación geológica).
- Variables financieras.

Cuando se trata de la primera fuente, normalmente falta información sobre el yacimiento (ley o valor, estructuras geológicas). Como resultado, muchas decisiones sobre una operación minera se basan en estimaciones o simulaciones creadas a partir de estos datos limitados. El análisis de variables financieras, como el precio, el costo y la tasa de interés- que dependen de una serie de eventos futuros incognoscibles- se encuentra en la segunda fuente.

Asimismo, de manera similar, estas incertidumbres se pueden clasificar en tiempo (futuro desconocido) y espacio (información de datos limitada). Por lo tanto, los estudios económicos deben basarse en estos recursos minerales medidos, indicados, inferidos o cualquier combinación de ellos, y deben revelar las tasas de producción minera, los costos de capital, los costos operativos y las proyecciones de flujo de efectivo. Para valorar los depósitos minerales se utiliza un proceso integral que incluye el alcance, la prefactibilidad y la viabilidad porque la minería es una industria con alto riesgo.

1.2. Modelamiento geológico del Yacimiento

1.2.1. Modelamiento Geológico

(Hernández Guerra, 2022) menciona que, el modelamiento geológico es una representación conceptual de algo incierto, de uno o más dominios geológicos. Estos dominios componen variedad de modelos (litología, estructura, mineralización). Se reconoce como una etapa temprana, crucial y previa al cálculo de los recursos minerales y se considera la fase de transición entre los campos de la ingeniería y la geología.

El objetivo de un modelo geológico es crear una representación tridimensional de un yacimiento o área.

Los sondajes exploratorios sirven como base para la creación de un modelo geológico, a esto se suma el conocimiento del tipo de yacimiento para un mejor entendimiento o interpretación. Hay que tener en cuenta que comprender el tipo de depósito mineral, cómo se forma y se comportan los fenómenos geológicos en el espacio ayudará enormemente a la precisión del modelo.

Existen dos tipos de modelamiento, y son:

- Modelamiento explícito
- Modelamiento implícito.

Modelamiento Explícito:

El proceso de modelado explícito implica unir los límites de las unidades comparables con polilíneas luego de proyectar (dos dimensiones, 2D) los sondajes en secciones en serie con el dominio geológico a modelar. Luego, las intersecciones en un tercer conjunto de secciones del plano se unen y así sucesivamente hasta terminar la triangulación, siendo como producto final un sólido en tres dimensiones (3D) que serviría para la estimación de recursos.

Este tipo de modelamiento tiene algunas desventajas, considerando que es un trabajo manual o criterio de una persona, normalmente esta persona es un geólogo de modelamiento con experiencia en el tipo de yacimiento y en la creación de geometrías complejas.

Cabe precisar que, se requiere mucho tiempo y es difícil de auditar por personal externo porque el modelo de cada geólogo es único y no puede ser reproducible; sin embargo, es rígido para actualizar el modelo cuando hay nueva información, razón por la cual no se actualiza con frecuencia. Así, aunque se tiene ciertas desventajas, el resultado de este modelo es confiable porque la persona que realiza tiene conocimiento del yacimiento.

Modelamiento Implícito:

Como sucede en el modelo explícito, la base de datos de entrada que se considera es la información tomada de la perforación diamantina. Asimismo, la evaluación de esta base de datos está en función a un algoritmo matemático a través del espacio. Este método no requiere la interacción manual ya que está automatizado.

El objetivo es el mismo: interpretar los dominios geológicos usando la información obtenida de la perforación (logueo, muestreo de canales mineros o trincheras superficiales).

En el 2003, los autores (Osher & Fedkiw, 2003) presentaron una metodología para el modelamiento implícito en su libro titulado: *“Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces”*, donde se tiene como fundamento a la interpolación de distancias obtenidas de la ubicación espacial de los dominios geológicos obtenidos de los sondajes que nos dice la función de distancia por signo, cuantifica la distancia que existe en los dos dominios geológicos, que podrían ser positivas y negativas, es decir, si están dentro o fuera de la litología en interés.

Función de distancia con signo

La metodología se explica en los siguientes pasos:

- Se requiere la codificación binaria de la variable categórica geológica; es decir, si consideramos dos unidades geológicas (A y B), a A se le asignará un valor numérico de 1 y a B un valor numérico de 0. Se debe tener en cuenta que esta función se limita a variables que tienen dos categorías. Sin embargo, se puede extender a múltiples categorías en una forma conocida como "función de distancia con signo múltiple", que se detallará posteriormente. Por ahora, esta función simplemente requiere que se comprenda los fundamentos del método implícito.

$$i(u_\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{si } z(u)_\alpha \text{ esta dentro de } A \\ 0, & \text{si } z(u)_\alpha \text{ esta fuera de } A \end{cases}$$

- Es comparar posiciones y calcular las distancias entre unidades geológicas. La distancia tomará signo negativo si la muestra está alineada con la unidad A, y signo positivo si es lo contrario.

$$d(u_\alpha) = \begin{cases} -\|u_\alpha - u_\beta\|, & \text{si } i(u_\alpha) = 1 \\ +\|u_\alpha - u_\beta\|, & \text{si } i(u_\alpha) = 0 \end{cases}$$

- Es habitual interpolar las distancias calculadas utilizando una función de base radial (RBF) o kriging regular, pero cualquier interpolador exacto, incluido el inverso de la distancia, es aceptable. El contacto entre las dos unidades geológicas estará indicado por los puntos o bloques donde la estimación sea igual a cero.

- Finalmente, se procede a codificar las distancias estimadas.

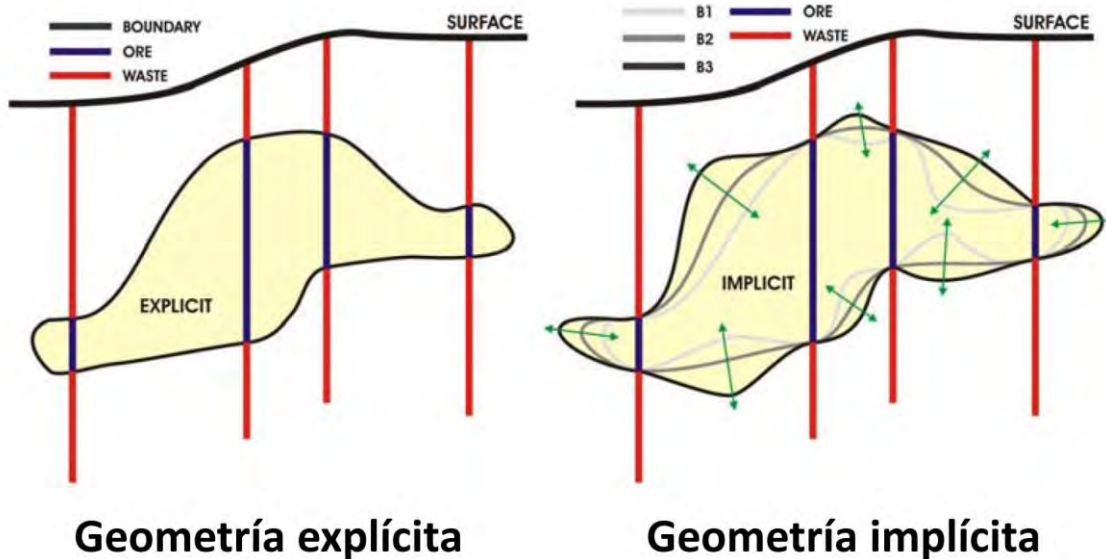
$$i^*(u) = \begin{cases} 1, & \text{si } d^*(u) \leq 0 \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

En la actualidad, los modelos geológicos (método implícito) están siendo realizadas por las herramientas del software Leapfrog.

La perforación diamantina y los análisis químicos (Assay) de los canales mineros fueron tomados en cuenta por la base de datos que se utilizó en el modelado. Además, se usó mapeo geológico, topografía de niveles y subniveles dentro de la mina, registro de perforaciones diamantinas, así como planos y secciones geológicas interpretadas.

Para ello, se puede observar la comparación entre el tipo de modelo:

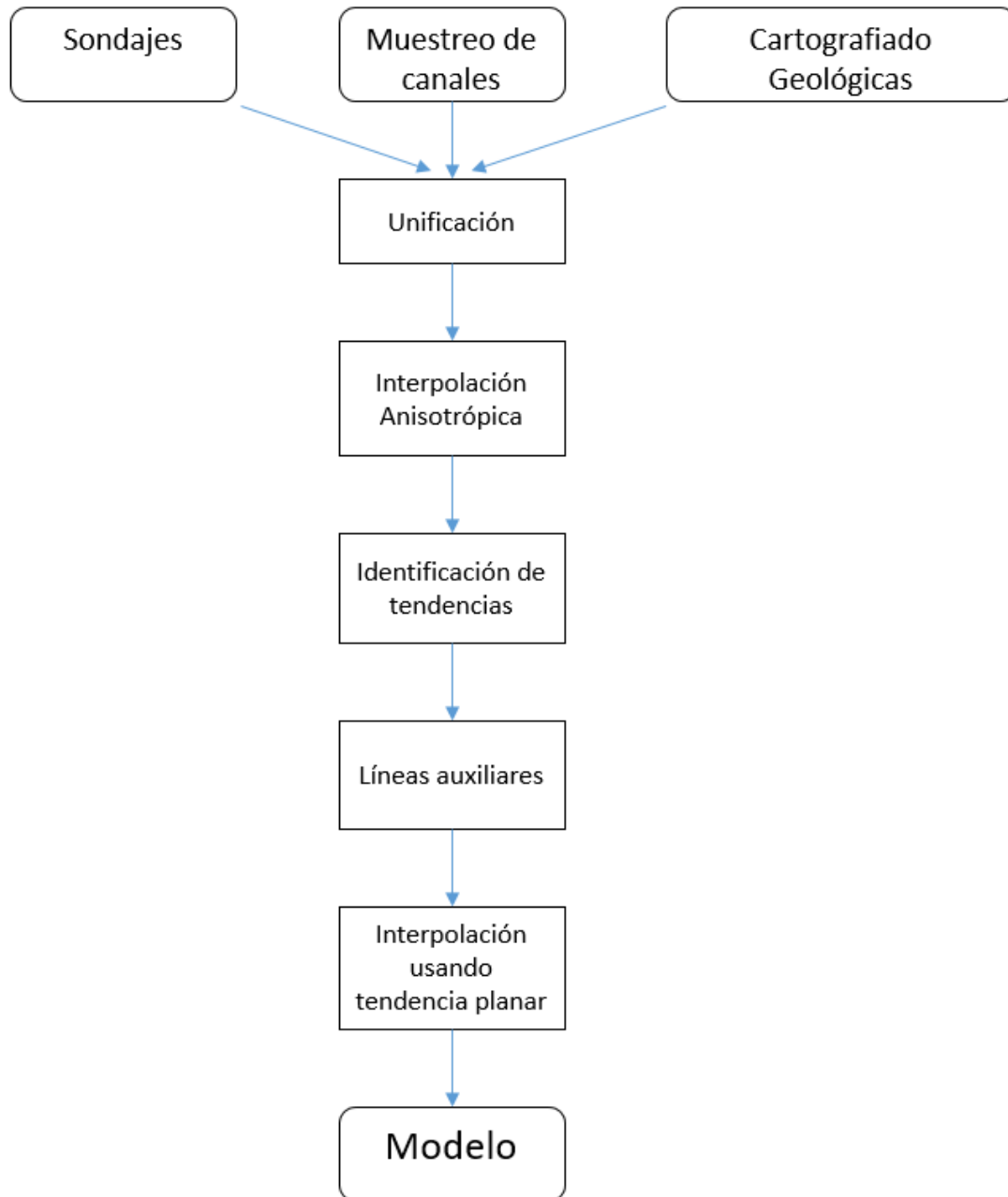
Ilustración 3: Comparación entre los tipos de modelos



Nota: Taller de Recursos Minerales, (Rivera, 2015).

Asimismo, para el modelamiento implícito se observa el siguiente diagrama de flujo:

Ilustración 4: Diagrama de Flujo de Modelamiento



Nota: (Vargas Machuca Bueno, 2017).

1.2.2. Densidad

(SRKConsulting, 2023) indica que la densidad es una cantidad significativa que interactúan las variables de sustancia (masa y volumen), asimismo, se puede expresar en los términos absolutos o relativos. Mientras que este último se refiere a la definición del material en sí, la densidad relativa es la comparación de las densidades de dos sustancias diferentes. La densidad se mide típicamente en g/cm³ para permitir la comparación. La fórmula de la densidad se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\text{Densidad } (\rho) = m / V$$

Donde: m → masa

V → Volumen

De esta manera, con frecuencia se combina la densidad con otras propiedades como la viscosidad o se utiliza términos como "grueso" o "pesado" en referencia a los sinónimos de densidad. Por lo tanto, podemos suponer que uno es más denso que el otro si percibimos que una bola de acero es más pesada que una lámina de acero. Sin embargo, la densidad del objeto puede permanecer constante. Para explicar por qué la bola de acero se hunde y la lámina flota, es importante evitar afirmar que las cosas flotan simplemente porque son menos densas.

Para evitar falacias, se debe recordar lo siguiente:

- Conocer bien los conceptos de masa, volumen y densidad para evitar asumir características de uno a otro.
- En lugar de limitar la fórmula de densidad a una sola cantidad, se debe definir la densidad como la asociación entre masa y volumen.
- Se debe tener en cuenta que la densidad es una propiedad compleja independiente de la cantidad.

- Se debe imaginar como una característica de la materia que lo distingue de otras sustancias.
- Se debe tener en cuenta que el valor de la densidad se ve afectado por la presión y la temperatura.

1.3. Estimación de Recursos

1.3.1. Análisis Estadístico, Variable Regionalizada

El análisis estadístico de las muestras, así como el procesamiento de las cantidades considerables de datos o variables, casi siempre implica algún tipo de análisis estadístico. Para caracterizar las distribuciones de frecuencia y sacar conclusiones sobre la población, se pueden utilizar estadísticas para describir y analizar los datos obtenidos a través del muestreo (Emery, 2010).

La media, moda y mediana son los tres indicadores principales de ubicación:

- **La media aritmética (\bar{x})**, Es obtenido sumando todos los valores y dividido por el valor número total de sumandos.
- **La moda**, es el valor medio de un grupo de valores cuando están dispuestos en orden ascendente o descendente. El valor o categoría más frecuente en el conjunto de datos está representado por la moda.
- **La mediana**, determina el valor central de la población. Es el resultado de realizar un conjunto específico de operaciones en un conjunto de números y, en determinadas circunstancias, puede sustituir al conjunto completo por sí solo.

La varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación son los principales medios de dispersión:

- **La varianza**, es una métrica para medir qué tan variable es un conjunto de datos en relación con su media.
- **La desviación estándar**, es una métrica utilizada para expresar la dispersión o variación de un conjunto de datos numéricos. Es la raíz cuadrada de la varianza.
- **El coeficiente de variación**, es una medida estadística que brinda información sobre la dispersión relativa de un conjunto de datos y también se conoce como coeficiente de variación de Pearson.

Las variables regionalizadas solo pueden ser estudiadas y analizadas dentro de un área o dominio específico, conocido como "campo" de la variable, porque no tienen una extensión infinita.

Para el presente trabajo, el campo es el área geográfica delimitada por el sitio de estudio, donde sea ha obtenido información relacionada con la perforación, y fuera de la cual no se conoce información específica en detalle.

Las variables regionalizadas son aquellas que reflejan cualquier tipo de espacio, ya sea temporal, geográfico o de otro tipo. Algunos ejemplos de estos serían:

- Leyes de los minerales.
- Gravedad específica de la roca.
- Recuperación metalúrgica.
- Tipos de roca.
- Alteración.
- Litología
- Mineralogía.

La geoestadística tiene en cuenta no solo el valor de la variable en el lugar de muestreo, sino la ubicación del punto en el cuerpo mineralizado y relación con otras muestras al realizar su análisis (Alfaro Sironvalle, 2014).

Para realizar las mediciones en zonas no muestreadas, es necesario contar con un análisis del comportamiento de las variables en estudio desde su origen natural. Es imposible describir cuantitativamente los procesos geológicos que dieron lugar al depósito porque son demasiado complejos para hacerlo.

Según la teoría de variables regionalizadas en 1962, desarrollada por (Matheron, 1970), fundador de la Geoestadística y cofundador de la Morfología Matemática, esta se basa en modelos probabilísticos en los que cada variable está como una relación distinta de la función aleatoria predeterminada. Cabe indicar que, las variables regionalizadas, que aparecen con frecuencia en las geociencias, presentan una distribución en el espacio junto a un grado de correlación espacial, como la ley de oro en un depósito con mineralización en brechas.

Además, las funciones aleatorias estacionarias se basan en las técnicas geoestadísticas más populares para la estimación de variables regionalizadas. Siendo $V(X)$ una función matemática unidimensional que detalla un fenómeno relacionado con una ley probabilística específica. La función $V(x)$ se denomina función aleatoria estacionaria siendo los pares las variables aleatorias, separadas por la distancia (h) una de otra ($V(x)$, $V(x+h)$); muestran la distribución de probabilidad conjunta, sin considerar su ubicación, dependiendo de la distancia (h) entre ellos.

El variograma, el correlograma y la función de covarianza son tres parámetros interrelacionados que, en general, pueden utilizarse para describir los comportamientos de una función aleatoria estacionaria.

1.3.2. Métodos de Estimación Geoestadísticas

(Emery, 2010) indica que, la estimación tiene como idea fundamental estimar el valor de una variable (ley de oro, densidad, etc.) desde una posición donde se desconoce el verdadero valor.

La estimación de las leyes y los tonelajes de minerales (variables regionalizadas) se realiza utilizando herramientas metodológicas considerando las características espaciales de los datos tomados in situ (variograma y Kriging) o tomando en consideración la información estadística tradicional (polígonos, inverso de distancia).

Kriging: es una técnica geoestadística de estimación, que ofrece el mejor estimador lineal insesgado de una variable desconocida.

Conocidos ciertos valores de una variable de interés Z , $Z(u_1)$, $Z(u_2)$, ..., $Z(u_n)$, se desea predecir $Z(u_0)$.

Se presenta la siguiente forma:

$$Z^*(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(u_i)$$

Donde:

- u → se refiere a la posición,
- $Z^*(u)$ → es una estimación en la posición u ,
- $Z(u_i)$ → $i=1, 2, 3 \dots n$, hay “ n ” valores de datos
- λ_i → se refiere a los ponderadores.

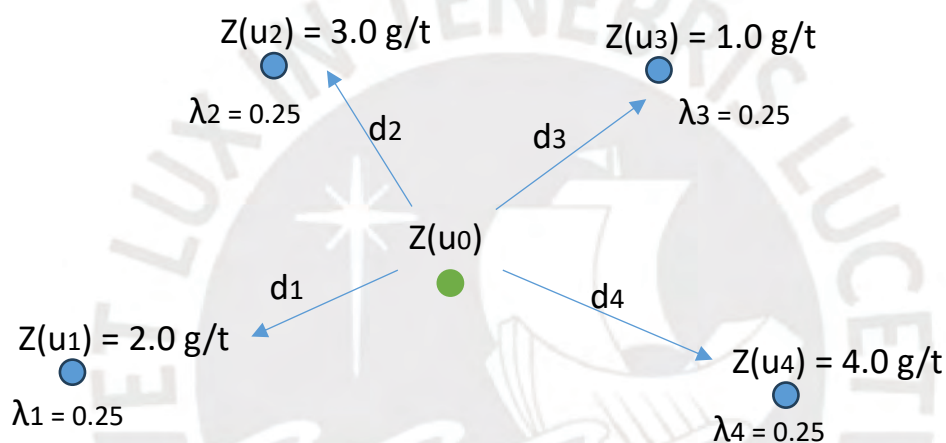
El kriging consiste en efectuar una ponderación (λ), esto quiere decir, atribuir un peso al valor asociada a cada muestra conocida. Esto pesos son calculados para obtener una varianza de estimación mínima, considerado las características geométricas de los elementos involucrados y la continuidad espacial de la variable en estudio.

Es fundamental tener en cuenta que la técnica de estimación más popular es el Kriging, incluidas todas sus variaciones (ordinario, simple, indicadores, etc.).

Es preciso indicar que, el Kriging es un grupo de métodos de regresión lineal generalizados para reducir la varianza estimada de un modelo de covarianza existente (Alfaro Sironvalle, 2014).

Además, el Kriging es conocido como el mejor estimador lineal insesgado o suavizado. Solo el error de mínimos cuadrados de un modelo de covarianza y varianza se califica como el mejor.

A continuación, un ejemplo de Kriging, se tiene 4 muestras distribuidas espacialmente y en base a estas muestras se solicita calcular $Z(u_0)$.



Utilizando la fórmula de Kriging

$$Z(u_0) = Z(u_1) * \lambda_1 + Z(u_2) * \lambda_2 + Z(u_3) * \lambda_3 + Z(u_4) * \lambda_4$$

Ahora por teoría la sumatoria de los pesos debe ser igual a 1, es dato del ejercicio:

$$\sum \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 0.25 + 0.25 + 0.25 + 0.25 = 1$$

Reemplazando los pesos.

$$Z(u_0) = 2 * 0.25 + 3 * 0.25 + 1 * 0.25 + 4 * 0.25$$

$$Z(u_0) = 2.5 \text{ g/t}$$

Se tiene varios tipos de Kriging:

- **Kriging Ordinario (OK):** la característica principal es que no se conoce la media de la población o dominio. Se tiene un variograma $\gamma(h)$, este puede o no, presentar meseta. El estimador se puede aplicar en situaciones donde la media no es constante en el campo y puede variar de una región a otra en el espacio siempre que sea aproximadamente constante en cada vecindad de Kriging. Esto es posible tratando el valor de la media como desconocido. Este estimador es más confiable.
- **Kriging Simple (SK):** Se conoce la media (m) de la variable regionalizada. El espacio normalmente se considera fijo e igual a la media (desagrupada) de los datos disponibles.

Matemáticamente se le considera como el más simple, pero el menos usado dentro del mercado.

También se conoce el variograma $\gamma(h)$, el cual presenta una meseta $\gamma(\infty) = \sigma^2$. Por lo anterior se tiene una función de covarianza dada por: $C(h) = \sigma^2 - \gamma(h)$.

- **Kriging en Bloque:** En general, es necesario estimar el valor promedio de una variable $V(x)$ en un volumen específico "Y". Discretizar el volumen "Y" en diferentes puntos y se calcula si la media del resultado de las estimaciones individuales de cada punto de los diversos procesos OK o SK es una forma de obtener la estimación.

(Resources & Committee, 2019) Una vez estimadas las variables regionalizadas, los recursos se categorizan según el grado de significancia de la estimación. Considerando el código JORC, la clasificación se da en tres niveles, y son:

- **Recursos inferidos:** Una porción de un recurso mineral que puede usarse para hacer estimaciones poco confiables del contenido, ley y tonelaje del mineral.

Se basa en datos inferidos mediante técnicas de localización apropiadas, como perforaciones de calidad y confiabilidad cuestionables.

- **Recursos indicados:** Una porción de un recurso mineral para el cual las estimaciones de tonelaje, densidad, forma, propiedades físicas, leyes y contenido mineral son razonables. Aunque las ubicaciones están lo suficientemente espaciadas como para que se pueda asumir la continuidad, están demasiado o inapropiadamente espaciadas para confirmar la continuidad geológica y/o de grado.
- **Recursos medidos:** una porción significativa de un recurso mineral, incluido el tonelaje, la densidad, la forma, las propiedades físicas, la ley y el contenido mineral, para los cuales se puede hacer una estimación de estos parámetros con alta confianza. Las distancias entre las ubicaciones son lo suficientemente cercanas como para garantizar la calidad o la continuidad geológica.

Los recursos demostrados son aquellos que han sido medidos e indicados, y son los que se tienen en cuenta para el reporte de recursos. Sin embargo, la definición de cada categoría es muy ambigua y necesita en gran medida de los estándares del experto. Las reservas (probadas, probables) son la porción de los recursos que se pueden explotar técnica y económicamente y, se dividen en categorías similares. La clasificación de los bloques en función de su varianza de estimación es una forma de determinar las categorías (la definición de las varianzas límite debe considerar la variabilidad de la geología y espaciamiento de muestreo).

1.3.3. Simulación Geoestadísticas

La interpretación de la variable regionalizada como una función aleatoria realizada es la base de la simulación. Para hacer esto, es necesario construir realizaciones adicionales de la misma función aleatoria.

Para lograr esto, es necesario comprender la función aleatoria en su totalidad, o todas las distribuciones de probabilidad.

- Distribución univariable
- Distribuciones bivariantes
- Distribuciones trivariantes

Simulación no condicional: no tiene en cuenta los valores de los datos en los lugares del muestreo. Solo se generan realizaciones arbitrarias de la función.

Simulación condicional: además, replica los valores de los datos en los lugares de muestreo:

- En un sitio con dato, todos los escenarios reproducen este dato
- Lejos de los datos, la simulación se vuelve no condicional

Las variables de la estimación de la ley y la varianza en un bloque, por sí sola no son suficientes para determinar qué tan incierta es la ley en todo el depósito. En función de una definición de calidad como la imparcialidad, el error de mínimos cuadrados, el uso frecuente de combinaciones lineales de los datos y el efecto de suavizado resultante, la estimación devuelve un valor lo más cercano posible al valor real (desconocido). Como resultado, el valor predicho subvalora los valores altos y sobrevalora los valores bajos (Alfaro Sironvalle, 2014).

Dado que el objetivo de las simulaciones es reproducir con precisión tantas características del conjunto original de datos como sea posible, a diferencia de la estimación, cuyo objetivo es identificar la característica promedio, las simulaciones exhiben un alto nivel de detalle de la variabilidad espacial.

La simulación difunde un modelo de variabilidad, que también permite calcular el nivel de incertidumbre de la respuesta antes y después de una función de transferencia.

El objetivo de la simulación es crear modelos que reflejen con precisión la variación en la variable relevante, que incluye los datos, el histograma (representativo) y la distribución espacial, que suele ser de segundo orden (variograma). Las simulaciones que se ejecutaron son equiprobables, lo que significa que incluso si difieren ligeramente entre sí, aún tienen la misma probabilidad de ocurrir.

En conclusión, el proceso de simulación nos permite representar la incertidumbre de la variable de la ley actual del plan de minado, mientras que Kriging proporciona el mejor valor promedio de la ley.

La secuencia que se debe considerar para realizar una simulación es:

- Producir una colección de datos aleatorios.
- Establecer relaciones espaciales entre los datos aleatorios.
- Ajustar la simulación en base a los valores.
- Examinar la distribución de los datos iniciales en comparación.

La simulación se puede aplicar en diferentes cálculos:

- Evaluar el riesgo en el cálculo del VAN.
- Categorización de recursos y reservas.
- Elaboración de una malla de muestreo que asegura cierta precisión en las estimaciones.
- Diseño de malla óptimo de perforación diamantina.
- Planificación minera: la variabilidad de leyes esperadas en el proceso del tratamiento de mineral.

- Control de leyes: la toma de decisión más oportuna para cada stop (bloque) si es enviar a planta o a botadero.
- Reconciliación de leyes mina, plata y comercialización.

Simulación Montecarlo: también conocido como el método Montecarlo o una simulación de probabilidad múltiple, este método está basado en técnicas matemáticas que utilizan para estimar los posibles resultados de un evento incierto.

Este método de simulación se basa en crear modelos de posibles resultados mediante la sustitución de un rango de valores (una distribución de probabilidad) para cualquier factor con incertidumbre inherente. Este método es útil para el análisis de riesgo cuantitativos, donde se asignan valores numéricos a los riesgos.

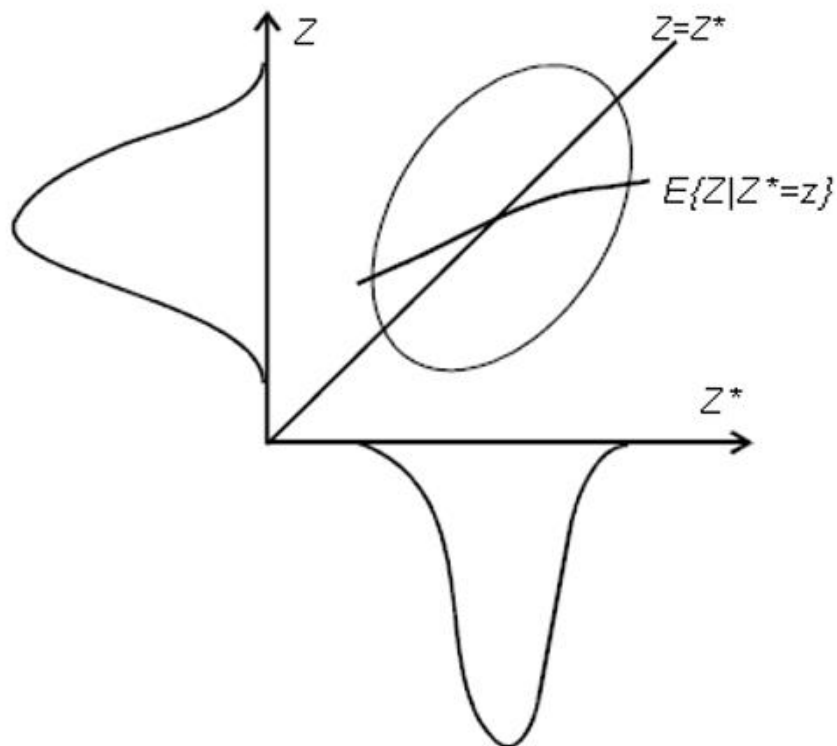
En el **análisis de riesgos mediante el método de Montecarlo**, se utilizan distribuciones de probabilidad. Es decir, probabilidad de que un riesgo ocurra. Esta es una forma mucho más realista de describir la incertidumbre en las variables de un análisis de riesgo.

En función de los cálculos de las distribuciones de probabilidad, la simulación ofrece una visión muy completa de lo que puede suceder. Los resultados de la simulación muestran no sólo lo que puede suceder, sino lo probable que es un resultado.

Simulación Secuencial Gaussiana (SSG): permite una rápida resolución de las etapas de la simulación, en los últimos años se viene considerando como el algoritmo de simulación condicional más conocido. Una simulación condicional gaussiana, para decirlo matemáticamente, produce realizaciones de **N** variables aleatorias basadas en los **N** datos disponibles.

La distribución de la ley original (izquierda) tiene mayor variabilidad que la distribución estimada (abajo). La correlación entre lo estimado (vía Kriging) versus lo real muestra sub y sobre estimación producto del suavizamiento.

Ilustración 5: Distribución de ley original (Z) vs. distribución ley estimada (Z^*)



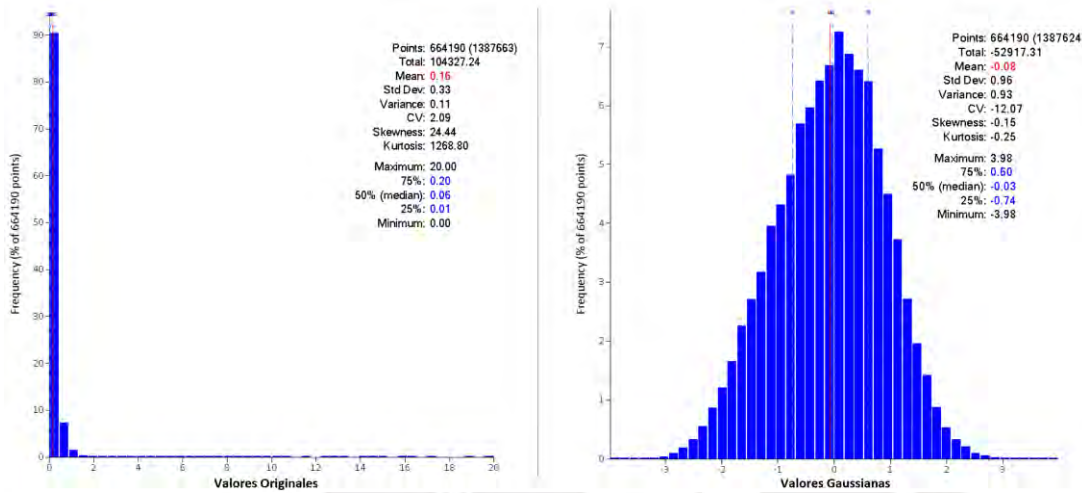
Nota: (Deutsch, 2017)

Para ejecutar una simulación condicional, se debe realizar las siguientes acciones:

- a) Desagrupamiento o Decluster: para una representación buena de un histograma, se puede utilizar diferentes métodos: de bloques, poliedros y peso en Kriging. Para este caso, se va a usar el software supervisor para calcular el bloque.
- b) Se debe transformar las muestras de origen en valores gaussianos $N(0,1)$ desplazando los cuantiles de la distribución desagrupada en la

dirección de una distribución gaussiana con la media y una desviación estándar de 0 y 1, respectivamente. También conocido como anamorfosis.

Ilustración 6: Ejemplo de transformación gaussiana de datos



Nota: Elaboración propia.

Si se denota,

- $G = (G(x), X Y Z) \rightarrow$ la función aleatoria que representa a la variable original
- $M = (M(x), X Y Z) \rightarrow$ la función aleatoria que representa la variable transformada
- $N(O) \rightarrow$ función de distribución de Z
- $P(Q) \rightarrow$ función de distribución de Y (gaussiana de media 0 y varianza 1)

c) En el proceso de simulación se considera inicialmente realizar el Análisis Estadístico Exploratorio (EDA) de las muestras y posteriormente, los análisis variográficos de cada variable en evaluación. Luego, los variogramas de los datos gaussianos y en base a esta información se puede realizar las validaciones.

d) Se debe definir una secuencia aleatoria que abarque todos los nodos de la malla antes de que pueda comenzar la simulación condicional gaussiana. Después de aplicar KS (Kriging Simple) de los datos

gaussianos y los vértices (nodos) previamente simulados, la media es igual al valor estimado por KS (Kriging Simple) y la varianza es semejante a la varianza de Kriging simple. Para obtener las demás simulaciones, se debe repetir el proceso.

- e) El paso final consiste en aplicar una transformación para devolver los valores originales de muestra a partir de los valores gaussianos.

El siguiente paso después de ejecutar las simulaciones iniciales dentro de una malla de puntos, es volver a bloquear las dimensiones de una SMU (Unidad Minera Selectiva), a lo que le sigue una comparación de las técnicas de estimación y la simulación condicional en la misma SMU.

1.4. Valor Presente Neto (VPN)

El criterio de inversión conocido también como Valor Actual Neto (VAN) que implica actualizar los pagos de un proyecto o la inversión para determinar la ganancia o pérdida de la inversión, se logra descontando todos los flujos de efectivo a la tasa de interés específica y llevándolos todos al presente.

El VAN cuantificará la valorización de un proyecto en términos netos, es decir, en términos de cantidad de dinero (por ejemplo, euros, dólares, pesos, etc.).

Para calcular el VAN se realiza considerando la siguiente fórmula:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

- F_t → Flujo de dinero por un periodo t
- I_0 → inversión realizada desde el momento inicial ($t = 0$)
- n → periodos de tiempo
- k → descuento

El VPN se utiliza para determinar dos tipos diferentes de decisiones: que tan factible son las inversiones y qué inversión es superior en términos absolutos. El VAN también se usa para elegir el proyecto que será más rentable si hay múltiples opciones de inversión. También es útil determinar la mejor opción dentro del mismo proyecto teniendo en cuenta varias proyecciones de flujo de ingresos y gastos.

Además, permite evaluar si el precio que se ofrece por un proyecto o empresa es superior o inferior al que se obtendría si no se vendiera.

La siguiente fórmula del VAN es otra forma que se puede utilizar.

$$\text{VAN} = \text{BNA} - \text{Inversión}$$

BNA (Beneficio Neto Actualizado), es cuando el valor actualizado descontado de un flujo de caja o utilidad neta proyectada es expresado en valor presente. Esta última cifra representa la tasa de rendimiento mínima anticipada. (Gala, 2020).

- **VAN < 0 → proyecto no es rentable.**

Indica que la inversión es mayor que el BNA (VAN negativo o menor que 0)

- **VAN = 0 → proyecto es rentable.**

Indica cuando el BNA es igual a la inversión (VAN igual a 0)

- **VAN > 0 → proyecto es rentable.**

Cuando el BNA es mayor que la inversión (VAN mayor a 0) se ha cumplido la tasa y, además, ha generado una ganancia o beneficio adicional.

1.5. Planeamiento Estratégico Minero

En el Perú, los depósitos minerales se pueden encontrar en la costa, pero en mayor cantidad en la Cordillera de los Andes, donde la mineralización se presenta como vetas, mantos y cuerpos. Las empresas mineras seleccionan los métodos de explotación en función del tipo de yacimiento (mineralización) y algunos otros factores. Puede provenir de la gran minería, la mediana minería, la pequeña minería o la minería artesanal dependiendo del volumen de producción.

Asimismo, se puede mencionar que, en la historia de la minería en el Perú, hubo muchos beneficios hacia los extranjeros a partir del año 1895 para iniciar con la explotación de las minas en el país. Después, en el año 1905 llega al Perú una empresa estadounidense y formó la Corporación Cerro de Pasco en 1915. Esta corporación funcionó hasta 1974, cuando fue nacionalizada.

Antes de tomar cualquier acción táctica específica, como la planificación a largo plazo o comercial, se debe completar la planificación estratégica de la mina. La optimización estratégica de la mina debe tener todo en cuenta. (García Dávila, 2011).

Por otro lado, es preciso indicar que, los procesos de planificación y evaluación de una mina subterránea se realizan por etapas, iniciando con el proceso principal del cálculo o estimación de los recursos (medido, indicado e inferido), y en base a esto se generaron las reservas (probadas y probables) de acuerdo con los estándares internacionales y el método de minado según la mineralización, luego se realizan el diseño de la mina, preparando la infraestructura primaria y detallando los preparativos siguiendo el diseño de la mina, la secuencia de avances y producción, con todo esto se programaran y determinarán un flujo de efectivo y producirán un VAN.

Además, se llevan a cabo diferentes análisis de incertidumbre y/o riesgo después de definir el proceso de planificación de la mina varias veces para determinar qué plan de mina es el más efectivo. Sin algoritmos de optimización

basados en computadora, la creación de estos escenarios requiere mucho tiempo y, por lo tanto, es muy costosa.

Las herramientas MSO (Mineable Shape Optimizar o Diseño automático de stopes), es una opción en la planificación minera de gran utilidad para generar el diseño de los tajos en forma óptima, para una variedad de métodos de explotación en minería subterránea considerando las restricciones: Cutoff, dilución, geomecánica y etc. MSO ofrece el mejor diseño de forma de tajo para maximizar el valor de un cuerpo mineral utilizando las propias restricciones del método. Los resultados son útiles para la planificación estratégica y táctica. En las operaciones de tajo abierto y subterráneas, para todo tipo de productos básicos y tamaños de minas, existe diversas variedades de opciones de software de programación y secuenciación disponibles en el mercado.

La capacidad de MSO para evaluar rápidamente varias técnicas o parámetros del tajo para ayudar a los ingenieros a crear un plan estratégico de mina basado en varios métodos de utilización de un depósito mineral es una de sus características clave (Furtado e Faria, Dimitrakopoulos, & Lopes Pinto, 2022).

Durante el proceso de planificación de la mina se decide qué parte del cuerpo de mineral se extraerá, además de cómo y cuándo se procesará. Las etapas que se deben considerar son: la definición de la envolvente económica o área económicamente rentable, definición del método de explotación, diseño operativo, secuenciamiento de minado y como etapa final se tiene la evaluación económica. Estas conforman el proceso interdisciplinario de planificación a largo plazo o estratégica. De esta forma, se puede calcular el beneficio económico del proyecto y las reservas mineras.

El proceso de integración y alineación de los planes con los objetivos estratégicos de la empresa se conoce como planificación estratégica en la industria minera. Al modificar los parámetros de entrada de un sistema de planificación minera que sea adaptable, teniendo como objetivo optimizar el VAN hasta de terminar los años de minado (LOM), obtenido de la cantidad de mineral extraído. La planificación minera enfrenta dificultades que exigen

procedimientos de entrada de datos manuales junto con flujos de procesos de simulación encadenados de varios softwares. Los equipos de planificación pueden -con la ayuda de soluciones de automatización y optimización de simulación.

- Reduzca la duración del ciclo de planificación incorporando procedimientos de flujo de trabajo en un entorno automatizado.
- Obtenga una secuencia de minería exhaustiva analizando varias combinaciones de escenarios para crear planes que sean más confiables y de mayor calidad.

Dentro del plan de minado se considera dentro de las reservas (probado y probable) que parte de la estimación de recursos (medido e indicado), los responsables de elaborar el plan de minado es el área de planeamiento.

Sin embargo, un proyecto será evaluado utilizando recursos minerales (medidos, indicados e inferidos), particularmente en los recursos inferidos que serán considerados para el plan minero a largo plazo, con el fin de probar la metodología para el impacto en el análisis de riesgos y para los fines de la tesis. El objetivo del tema de investigación es crear un método para medir el riesgo que tenga en cuenta la influencia de variables geológicas, en este caso parámetros operativos constantes como la dilución, la recuperación minera y el valor del oro en recursos inferidos, sobre la incertidumbre del valor presente neto.

1.6. Gestión de Riesgo

(Esan, 2016) sostiene que un riesgo es una situación en la que puede ocurrir un evento que sea de negativo el impacto en el objetivo de una empresa. Asimismo, la gestión integral de riesgos (GIR) significa presentar la gestión de riesgos en blanco y negro, haciéndola visible interna y externamente como parte de una gestión corporativo. Aunque esta práctica no es muy usual entre

empresas fuera del sector financiero, puede incrementar la eficiencia del mercado y la confianza de los inversores.

Por lo tanto, GIR (Gestión Integral de Riesgo) es un componente importante en la capacidad de una empresa para recaudar fondos. La claridad sobre las actividades de una empresa crea la evidencia necesaria para tener la confianza del mercado. Por ello, las empresas que hayan certificado como un buen gobierno corporativo, incluyendo diversos aspectos como GIR, podrán endeudarse en el mercado y emitir instrumentos financieros para obtener recursos para financiar proyectos.

Los inversores compran estos valores con la confianza de que su dinero está en buenas manos. Cabe precisar que GIR incluye una serie de fases que se definen a continuación:

- **Identificación:** es el proceso de identificar sucesos internos y externos que pueden tener una negativa en las metas de una organización. Entre otras cosas, se tienen en cuenta las posibles interacciones entre el evento y los factores que influyen en él.
- **Evaluación:** estimar el riesgo en una organización, actividad o grupos de actividades, sector, cartera, producto, utilizando métodos cuantitativos, cualitativos o, una combinación de ambos.
- **Tratamiento:** este proceso implica aceptar riesgos y proponer diferentes soluciones. Por ejemplo: minimizar el riesgo, reducir la probabilidad de que ocurra un suceso, reducir el impacto de un este, transferir todo o parte del riesgo, o una combinación de estas. Dependiendo del nivel de tolerancia al riesgo definido.
- **Control:** proceso de asegurar que las políticas, estándares y procedimientos de gestión de riesgos se adopten y/o implementen adecuadamente. Las funciones de control consideran controles generales y de aplicación sobre los sistemas de información y la

tecnología de la información relacionada. Cabe precisar que, los controles garantizan la eficiencia y eficacia en las operaciones de una empresa, la credibilidad de la información financiera u operativa interna y externa, así como el cumplimiento de los requisitos legales aplicables.

- Información y comunicación: a través de este proceso, se genera y comunica información relevante y oportuna a la gerencia, los empleados y las partes interesadas externas como clientes, proveedores, accionistas y reguladores. Esta información es interna y externa, además, puede incluir información de gestión, financiera y operativa.
- Seguimiento: consiste en evaluar la existencia y el buen funcionamiento de un sistema integral de gestión de riesgos. Esto puede ocurrir como parte de las operaciones normales de una empresa. También, incluye informar de los defectos o desviaciones identificados y su corrección.

La gestión integrada de riesgo también requiere la asimilación de políticas, manuales y procedimientos. Por ello, una buena gestión requiere sistemas de alerta, acciones de cumplimiento y mecanismos de presentación de informes. Además, se requieren controles internos apropiados para garantizar que toda la organización se comporte de la misma manera con respecto a alertas, acciones de control o sistemas de informes.

Finalmente, la gestión Integrada de riesgo implica la obligación de un control interno y aseguramiento de la calidad ya que es un proceso diseñado para garantizar que las políticas, estándares, límites y procedimientos de gestión de riesgos se adopten y/o implementen adecuadamente.

1.7. Incertidumbre y riesgo en minería

(Vila J & Zafra J, 2019). La incertidumbre, que puede ir desde la incertidumbre total hasta la falta casi total de convicción sobre un resultado, es un término común que se usa para describir la falta de certeza sobre algo o alguien. La duda es a menudo sinónimo de escepticismo, sospecha y desconfianza. Cada sinónimo transmite una faceta diferente de la incertidumbre que es relevante para el análisis de riesgos.

Asimismo, cuando se trata de fenómenos naturales, la incertidumbre se refiere a un resultado desconocido o no probado y, por lo tanto, incierto. La incertidumbre acerca de una creencia indica que una conclusión no está probada o se basa en evidencia inestable. Un plan es indeterminado o indeciso cuando existe incertidumbre al respecto. (Munizaga Rosas, 2018)

El riesgo tiene dos componentes:

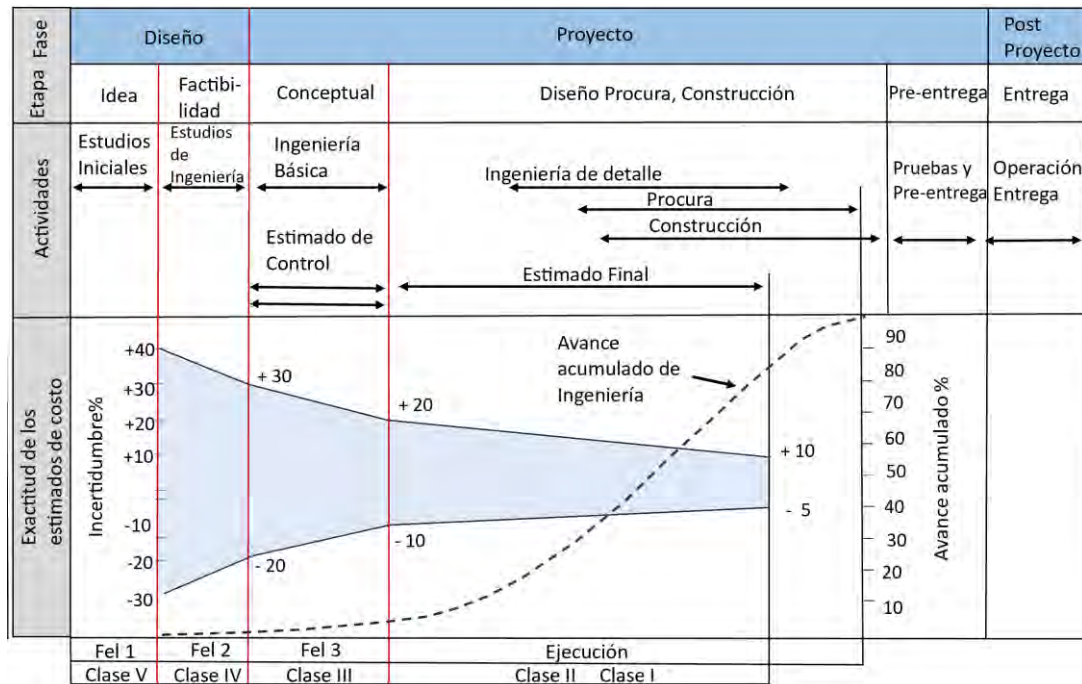
- Volatilidad, asociada a la probabilidad de que una variable de riesgo cambie en un determinado porcentaje.
- La sensibilidad o exposición que tiene el proyecto respecto a esa variable de riesgo.

(Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012) Se define el riesgo como la probabilidad de que se produzcan resultados favorables o desfavorables. Cuando los factores de producción están sujetos a un resultado incierto, esta incertidumbre afecta las técnicas convencionales como el Valor Actual Neto (VAN) determinista y puede hacer que el valor de los factores disminuya cuando se aumenta la tasa de descuento. Es importante recordar que algunas metodologías incorporan flexibilidad.

Las opciones reales, por ejemplo, ilustran el aumento de la valorización de un proyecto al calcular las estimaciones aumentar positivamente la flexibilidad al reconocer eventos que pueden aumentar el valor.

En las diferentes etapas de o fases de un proyecto minero se tiene niveles de incertidumbre. En la siguiente figura se observa cómo avanza el nivel de incertidumbre (que disminuye, mas no se elimina).

Ilustración 7: Etapa de proyecto con incertidumbre

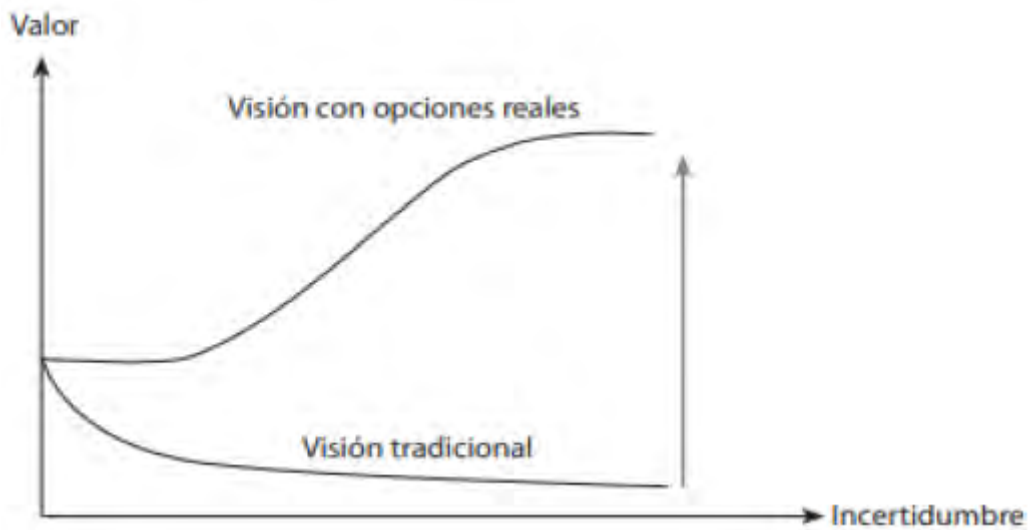


Nota: (Bravo Mendoza & Sánchez Celis, 2012)

En los enfoques tradicionales, la incertidumbre reduce el valor del proyecto; sin embargo, desde una perspectiva de opciones prácticas, reconocer y explotar la flexibilidad de los eventos puede aumentar el valor de un proyecto a pesar de mayor incertidumbre. (Mendiola, y otros, 2014).

Para ello, se observa la siguiente figura:

Ilustración 8: Visión con opciones reales



Nota: (Urieta Gómez, 2021)

Las industrias mineras enfrentan incertidumbres significativas que resultan en riesgos técnicos y financieros. La reserva de mineral es el riesgo técnico más crítico. En el aspecto financiero, las fluctuaciones de precios configuran el riesgo financiero. Por lo general, se lleva a cabo un proceso de evaluación de riesgos porque los precios de las materias primas son difíciles de predecir con cierto grado de precisión.

La simulación Monte-Carlo es un enfoque común para evaluar los riesgos en las industrias mineras y requiere la reproducción de la correlación entre las variables inciertas. Cuando estas correlaciones no son lineales, el problema se vuelve más complicado y requiere atención especial. Una forma de incorporar relaciones no lineales en el análisis de riesgo es utilizar las cópulas.

Tabla 1: Incertidumbres técnicas más comunes

Tipo	Incertidumbres técnicas más comunes
Geológica	leyes, tonelajes de los recursos, consistencia geológicas, clasificación de recursos y densidad.
Geotécnica	Caida y estallido de roca, fallas.
Metalúrgica	Recuperación (%), espera e procesamiento (cinematica) calidad del producto
Operacionales	Equipos, recursos humanos, deterioro de la infraestructura, variabilidad de la mezcla a planta, disponibilidad de insumos,
Proyectos	Atraso de proyectos, ramp up, capacidad de extracción, capacidad de procesamiento.
Organización	Paralizaciones de las comunidades, productividad laboral.

Nota: Elaboración propia.

Tabla 2: Incertidumbre externa de los proyectos mineros

Tipo	Incertidumbres externas más comunes
Mercado	Precio del commodity principal y subproductos.
Financiero	Tasa de interés y accesibilidad de los recursos.
Política	apropiación de recursos, gobierno fuerte.
Legislación	cambio en las leyes laborales, así como un cambio en las tasas de impuestos y/o regalías.
Sociales	estabilidad social y demandas comunitarias.
Ambientales	Permisos ambientales, cambios en la regulación (partículas, gaseosos u otros materiales).
Comerciales	cambios en los requisitos para las compras.
Industriales	Competencia de precios, producción de otros productores, confiabilidad de los proveedores, entrada de nuevos productores, poder de mercado de los clientes y sustitución.
Tecnológicas	Avances tecnológicos modernos y nuevas capacidades de tratamiento de minerales.

Nota: Elaboración propia.

Debido a la naturaleza de la industria minera, existen varios niveles de incertidumbre en los insumos para la planificación de la mina. Los riesgos y la toma de decisiones pueden verse influenciados por la incertidumbre, y esto se basa en cuánto sabe sobre el tema.

La incertidumbre pura se puede encontrar en un extremo de la escala determinista y en el otro. Existen problemas de riesgo entre estos dos casos (Damghani, Taghavifard, & Moghaddam, 2019). El riesgo y la incertidumbre son dos ideas distintas, pero relacionadas.

Se debe indicar que, las variables en la incertidumbre no se pueden conocer y están sujetas a cambios, pero su incertidumbre se puede conocer y reducir con el tiempo a través de eventos. Dicho de otro modo, la incertidumbre es la probabilidad de que algo suceda o no; por el contrario, el riesgo es algo que experimentas como resultado de la incertidumbre. En conclusión, son los resultados de eventos que eran un tanto inciertos de materializarse, puesto que el riesgo puede permanecer igual a lo largo del tiempo mientras aumenta la incertidumbre (Mun, 2015).

1.7.1. Fuentes de Riesgos e incertidumbre en la evaluación de recursos perforación diamantina

Dado que la perforación diamantina corresponde al insumo principal del proceso para calcular los recursos, tiene implicaciones significativas para las toneladas de mineral y estimación de leyes.

Para caracterizar el yacimiento con la mayor precisión posible, es fundamental que la campaña de perforación pueda ofrecer la mejor información posible, lo implica que cumple con un buen QAQC (Aseguramiento y Control a la Calidad).

Son muchos los factores que se deben tener en cuenta a la hora de ejecutar una campaña de perforación. La mayoría de ellos están relacionados con la etapa del proyecto en estudio y el tipo de yacimiento que se procura evaluar (perfil, prefactibilidad, factibilidad).

Las siguientes son algunas de las incertidumbres o factores de riesgo que se observaron durante esta etapa:

- Espaciamiento de sondaje (malla de perforación).
- Tipo, buzamiento y diámetro de perforación.
- Errores en la posición de "collar" y desviación de los taladros o sondajes diamantinos.

Malla de perforación diamantina

Para delimitar y definir con suficiente precisión un depósito una vez descubierto, es necesario estandarizar una malla óptima de perforación, lo cual se hace bajo el supuesto de que el depósito es grande, homogéneo y complejo. La pregunta final es: ¿Cuál sería el espaciamiento óptimo que se debería considerar en una malla de perforación para delimitar con precisión un yacimiento?

Por este motivo, la distancia entre los pozos de perforación o las mallas de perforación puede llegar a ser crítica. Hay muchos ejemplos del daño que puede causar el espaciamiento excesivo de los pozos de perforación. La reducción de la incertidumbre a expensas de una excesiva inversión de capital en la perforación se produce cuando el espaciamiento es demasiado cercano.

Por otro lado, demasiado espacio entre perforaciones puede provocar errores críticos en la forma de entender el yacimiento. Como resultado, el costo de la malla de perforación está relacionado con el nivel de riesgo que los directores del proyecto están dispuestos a asumir.

Cuando no se caracteriza el espaciamiento de las mallas de perforación, hay una brecha en los datos tomados y generados adecuadamente en la geología y geometría del depósito, respectivamente y, en consecuencia, la persistencia de la mineralización.

Esto puede tener un impacto significativo en la clasificación de las reservas. La resolución de la continuidad del yacimiento será pobre si no hay datos suficientes.

Por ejemplo, el recurso en cuestión es de muy baja significancia, como se mencionó anteriormente, por lo que la empresa minera no podrá tomar decisiones económicas al respecto. En cambio, solo podrá considerar recursos inferidos en la etapa de viabilidad del proyecto con la densidad de malla de perforación que se necesita.

Logueo y muestreo

Dentro del proceso de evaluación o cálculo de recursos se ve significativamente afectado por el logueo y muestreo de sondajes porque permite seleccionar una muestra representativa del depósito basada en los datos recopilados de todos los sondajes ejecutados. Los procedimientos de muestreo inadecuados tienen el potencial de causar errores sistemáticos en la recopilación de datos en cualquier momento durante una operación minera.

Según (Valenzuela Saintard, 2013) este nivel de incertidumbre o parámetro de riesgo se ignora en gran medida en las etapas de las estimaciones de recursos y reservas de yacimientos. Son especialmente significativos los errores o incertidumbres que resultan de un muestreo no representativo para los yacimientos de baja ley.

Se debe considerar como riesgo en esta etapa a:

- Error de muestreo.
- Errores en la segregación y agrupación.
- Error de delimitación y extracción.
- Baja recuperación de las muestras en la etapa de perforación.

Interpretación y Modelamiento geológico

La interpretación y el modelado geológico de un yacimiento es de suma importancia para la estimar de recursos y reservas minerales de un yacimiento.

La definición de recursos y reservas minerales de los códigos internacionales como JORC, NI43-101, SK1300 y otros códigos utilizados para la evaluación de recursos dependerá mucho de la continuidad geológica del yacimiento en estudio, en que se sobreentiende que la continuidad geológica está considerando la geométrica de los dominios geológicos o zonas mineralizadas.

Además, está claro que el entendimiento de las continuidades geológicas y las leyes del depósito es fundamental para comprender la distribución de leyes dentro del depósito y para la calidad de la estimación de los recursos minerales. Estos parámetros definen los tipos de límites entre las unidades mineralizadas y litológicas. La variabilidad de largo y corto alcance se explica tanto por la continuidad, que también identifica las causas de las anisotropías y las direcciones espaciales de preferencia. Es crucial enfatizar que el modelado y la estimación de recursos dependen de la continuidad geológica, ya que tiene efectos significativos en la estimación del tonelaje.

Los patrones de zonificación mineral deben establecerse con base en las fases de mineralización del depósito. Es necesario determinar la naturaleza de la zona de contacto mineral porque tiene un impacto significativo en cómo se evaluará los recursos minerales. Por ejemplo, un contacto duro se tratará como una discontinuidad y los datos de ambos lados del contacto serán completamente independientes. Un contacto suave conocido también como un contacto de transición va a requerir información de ambas zonas para una caracterización más exacta. Es obvio que contacto suave no considerará que los datos sean independientes. Además, de lo anterior mencionado, es fundamental tener y gestionar con claridad la génesis del depósito.

Las discrepancias significativas entre la ley, la recuperación metalúrgica, la densidad y otros parámetros esenciales de evaluación económica del proyecto pueden deberse a una interpretación incorrecta de la geología de los diversos dominios estructurales, cambios litológicos y variaciones genéticas del depósito.

Un error fatal en la selección del método de explotación puede deberse a errores de interpretación geométrica provocados por el desconocimiento o interpretación incorrecta de la localización y desplazamiento de fallas o zonas plegadas.

Por ello, grandes errores en la estimación de las propiedades geotécnicas, que pueden dar lugar a errores en la elección del método de explotación o a una subestimación de los costes, pueden deberse a un control inadecuado del RQD, de la familia de caracterización de las juntas y de otros aspectos estructurales.

Los riesgos enumerados anteriormente suelen estar estrechamente relacionados con problemas de vacíos o ausente de información causadas por una malla de perforación muy abierta o una mala determinación en la orientación de la perforación.

Como resultado, se tienen grandes errores durante la estimación de recursos por presentar errores en el modelo geológico que pueden resultar unos riesgos significativos para la evaluación económica del proyecto, como puede ser:

- Variabilidad o continuidad en la geología.
- Un error en la definición del límite de depósito.
- Errores cometidos en la mineralogía del yacimiento.
- La existencia de elementos estructurales como pliegues, desperfectos, etc.

Estimación de Recursos

(Emery, 2010) indica que la estimación de los recursos de un yacimiento debe ser precisa para poder acceder al mercado de capitales y poder financiar cualquier proyecto de inversión minera, ya sea en etapa de exploración, factibilidad o construcción. La estimación geoestadística se realiza una vez finalizados el modelado geológico y la interpretación del yacimiento. Antes de la estimación, es una práctica común crear dominios o contornos de intervalo de leyes del yacimiento porque hacen que la interpolación sea más precisa.

Asimismo, en la etapa de estimación de recursos destacan especialmente los siguientes parámetros de incertidumbre:

- Un error en la estimación de los diferentes dominios de la ley.
- El tamaño de bloques utilizadas en la estimación.
- La variabilidad espacial de los datos del semi variograma (también conocida como efecto pepita).
- La técnica de estimación utilizada.

1.7.2. Análisis de Riesgo

Una vez que se han identificado y categorizado los riesgos, se evalúa realizar un análisis de cada uno, lo que implica observar el comportamiento de la probabilidad y los efectos del riesgo para determinar el nivel de riesgo de un proyecto. Cabe precisar que, un proyecto minero conlleva importantes riesgos financieros a pesar de las enormes ventajas que pueden generar.

La estimación de los riesgos derivados de las incertidumbres internas y externas es necesaria para un análisis preliminar, especialmente en el caso del plan de minado, para posteriormente gestionar y analizar estos riesgos, y tratar de reducir o eliminar sus efectos (Mun, 2015).

La aplicación de un análisis de escenarios es una forma de lidiar con las incertidumbres y los riesgos que conllevan (Mun, 2015). El peor de los casos, el escenario nominal y el mejor, pueden elegirse entradas potenciales para una determinada variable de evaluación del proyecto como primera aproximación.

Valor en Riesgo también es conocido como VaR (Value at Risk), es un método que nos ayuda a medir la exhibición en los riesgos financieros o riesgo de mercado.

$$VaR(x\%) = \mathbb{E}[NPV] - \text{Safe Value}(x\%)$$

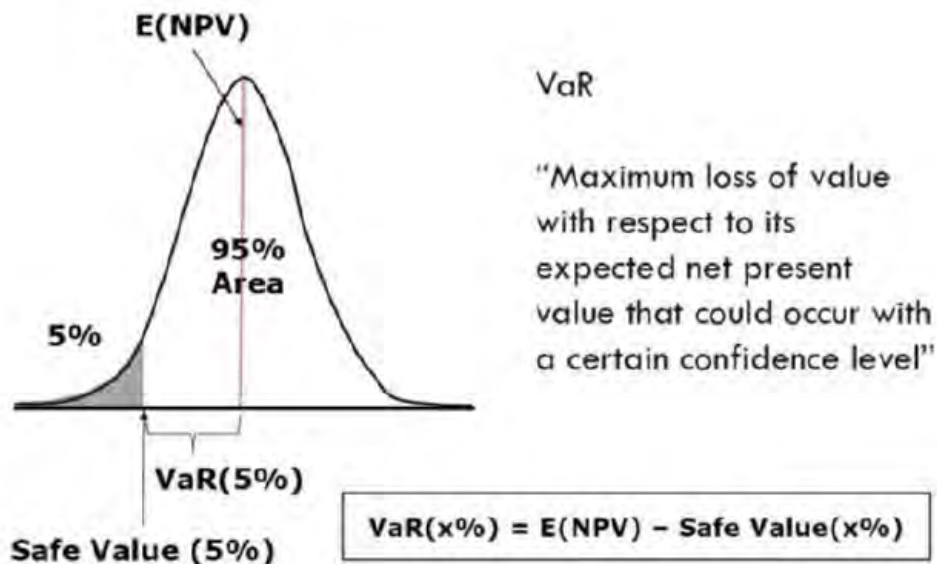
VaR: representa el rango entre lo esperado y el peor caso probabilístico con un nivel de confianza de 95%

Safe Value (x%): valor de seguridad dentro de un nivel de confianza. Para el caso de estudio, se va a considerar una probabilidad de 5%, esto quiere decir que, se tendría un nivel de confianza al 95%.

E(NPV): valor de la media de los diferentes escenarios. Para la presente investigación se va a considerar la mediana, siendo este el valor que se encuentra en la mitad de la población.

Es una metodología que se ha aplicado con éxito a campos no financieros mientras ganaba una posición dominante como estándar en la industria financiera.

Ilustración 9: Formulación del VaR



Nota: (Munizaga Rosas, 2018)

Definición matemática de VAR, dado un nivel de confianza $\alpha \in (0,1)$, el VaR de la cartera en el nivel de confianza está dado por el número l más pequeño tal que la probabilidad de que la pérdida L excede l es como mucho $(1 - \alpha)$.

$$VaR_{\alpha}(L) = \inf\{l \in \mathbb{R} : \mathbb{P}(L > l) \leq 1 - \alpha\}$$

$$= \inf\{l \in \mathbb{R} : F_L(l) \geq \alpha\}$$

DVaR, es la desviación del VaR en función al objetivo.

$$DVaR(5\%) = \text{objetivo} - \text{safe value}(5\%)$$

PVaR, es la proporción del VaR en función al objetivo.

$$PVaR(5\%) = DVaR(5\%) / \text{objetivo}$$

VaR complementa la información existente.

Complementa más que modifica los criterios de selección de proyectos (valor y rentabilidad). Asimismo, le permite concentrarse en los parámetros de riesgo e incertidumbre más importantes de un proyecto. Hace posible una comunicación más explícita. Mejora la cultura de riesgo de la empresa.

Cabe señalar que, el VaR y el análisis de sensibilidad son comparables en el sentido de que ambos cuantifican los efectos de los cambios en parámetros inciertos sobre el valor de los proyectos.

Asimismo, el VaR es mejor que el análisis de sensibilidad de tres maneras:

- Asigna una probabilidad de ocurrencia a las variaciones de los parámetros.
- Se debe tener en cuenta cómo se correlacionan los diferentes cambios de parámetros.
- Ofrece una medida de sensibilidad individual o global.

La mayoría de las empresas mineras evalúan los recursos minerales utilizando técnicas de estimación lineal más comunes en la industria (Kriging Ordinario e Inverso de la distancia). Después, los recursos se convierten en reservas, las cuales se toman en cuenta al evaluar la viabilidad técnica y financiera de un proyecto.

Para evaluar el grado de incertidumbre de la ley del yacimiento, mediante el presente trabajo se desea describir una metodología que utiliza principalmente la simulación condicional de la ley del yacimiento (variables geológicas). Una evaluación de la variabilidad de la variable geológica, como la ley, normalmente no se tiene en cuenta al evaluar los planes de minado; en cambio, solo se toma en cuenta una proyección de los precios de los commodities o metales para toda la vida útil de la mina.

El caso de estudio se desarrolla específicamente en el cuerpo mineralizado formado en base a los valores 1 gr/t y 2 gr/t, y la metodología se aplica a un secuenciamiento de minado, cinco años, para determinar la PVaR de la ley de oro.

Elementos de la Metodología

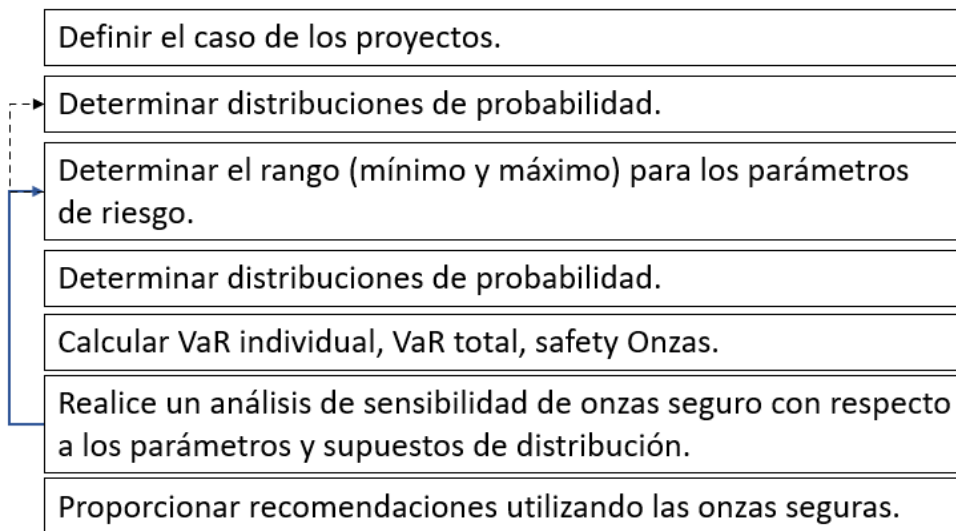
A continuación, se menciona los elementos:

- Riesgo, como combinación de incertidumbre e impacto negativo (consecuencias). Fácil de implementar hoy, dados los elementos de análisis de riesgo que se utilizan actualmente, primero se trabaja el caso determinista y luego, variaciones sobre este y requiere fortalecer el análisis inicial. Todo ello obliga a especificar mejor los casos extremos.
- Focalizar la atención en los eventos con impacto negativo. La medida es fácilmente traducible al impacto financiero.
- Estimación VaR, para su aplicación en minería existen dos formas de estimar el VaR:
 - Método paramétrico
 - Simulación

Ya se ha discutido la simulación, por lo tanto, el enfoque estará en el método paramétrico.

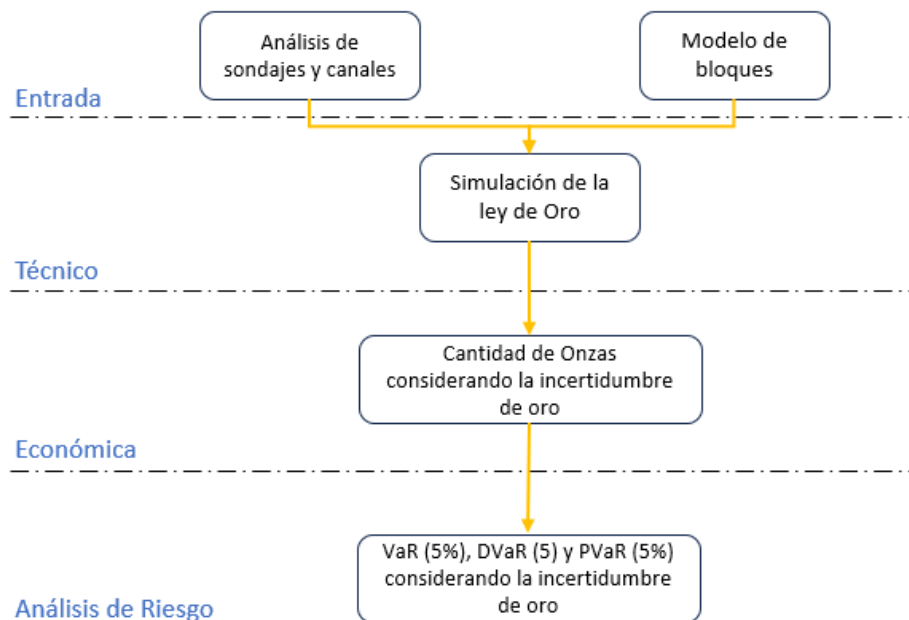
Para determinar el Valor en Riesgo (VaR) del proyecto, se crearon un total de 60 simulaciones de ley de oro.

Tabla 3: Procedimiento de cálculo del VaR paramétrico



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 10: Diagrama del proceso de la metodología



Nota: Elaboración propia.

La metodología esta subdividida en cuatro etapas:

- Entrada: viene hacer la información generada en la estimación de recursos.
- Técnico: proceso de simulación considerando los diferentes escenarios.
- Económica: evaluación considerando las variaciones de unas variables y la otra siendo fija y otra, cuando las dos variables que son fijas consideran la incertidumbre.
- Análisis de riesgo: considerando el rango planteado por el autor.

Rango de PVaR:

PVaR < 5%	Riesgo Bajo
5% < PVaR < 15%	Riesgo Medio
15 < PVaR < 25%	Riesgo Alto
PVaR > 25%	Riesgo muy Alto

El valor del bloque se calcula según la formula:

$$\text{Finos (Au_Oz)} = \text{Ton} * \text{Ley}$$

Donde:

Au_Oz → finos de oro

ton → tonelaje

Ley → Ley de Oro

Evaluaremos el grado de incertidumbre en la Ley del Oro traducida a onzas, considerando la densidad y NSR como valores fijos. Se va a considerar la Probabilidad del Valor en riesgo dentro de lo siguiente casos:

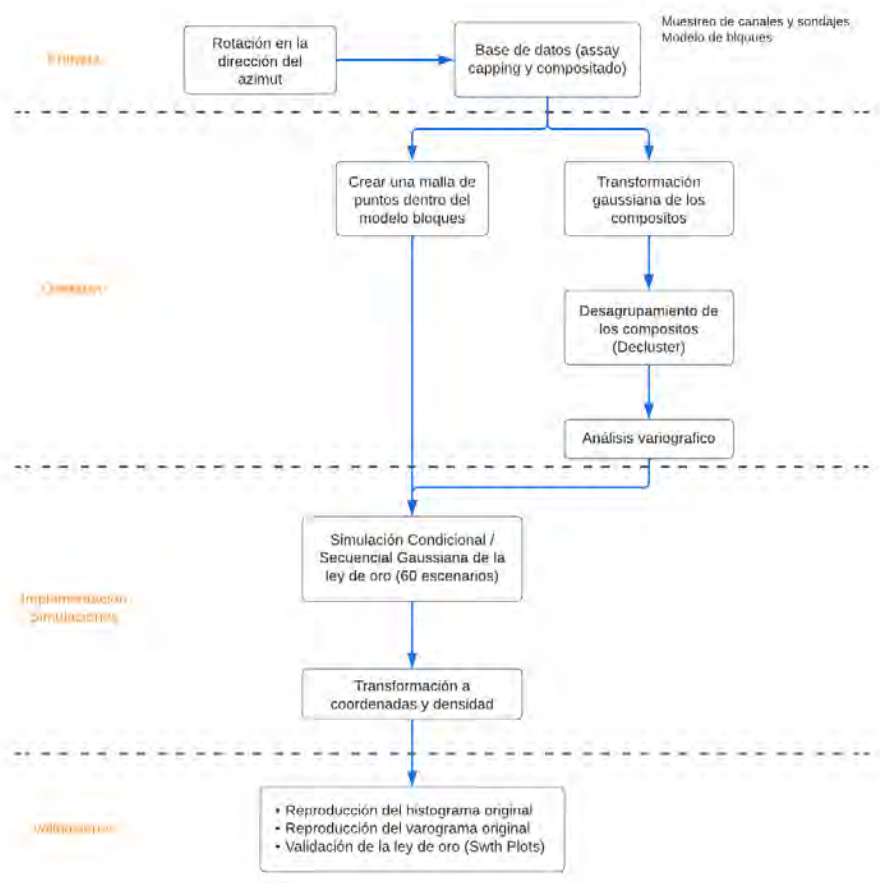
- Caso 1:
Plan de minado convencional
- Caso 2:
Plan de minado considerando el análisis de riesgo

1.8. Marco Teórico

1.8.1. Método para calcular el grado de incertidumbre de la Ley de Au

Se puede observar el sector de entrada en el diagrama (Ilustración 11), que representa los datos necesarios para llevar a cabo el proceso de la simulación gaussiana condicional de la Ley del Oro. Para que la simulación y la estimación sean comparables, los datos se componen y acotan con respecto a la misma longitud y ley máxima utilizada en la estimación del elemento (dentro del proceso de reporte de Recursos Minerales). La creación de una malla densa que represente el muestreo sistemático fue el siguiente paso en la simulación, que involucró la creación de una malla de puntos dentro del modelo de bloques (utilizado en la estimación).

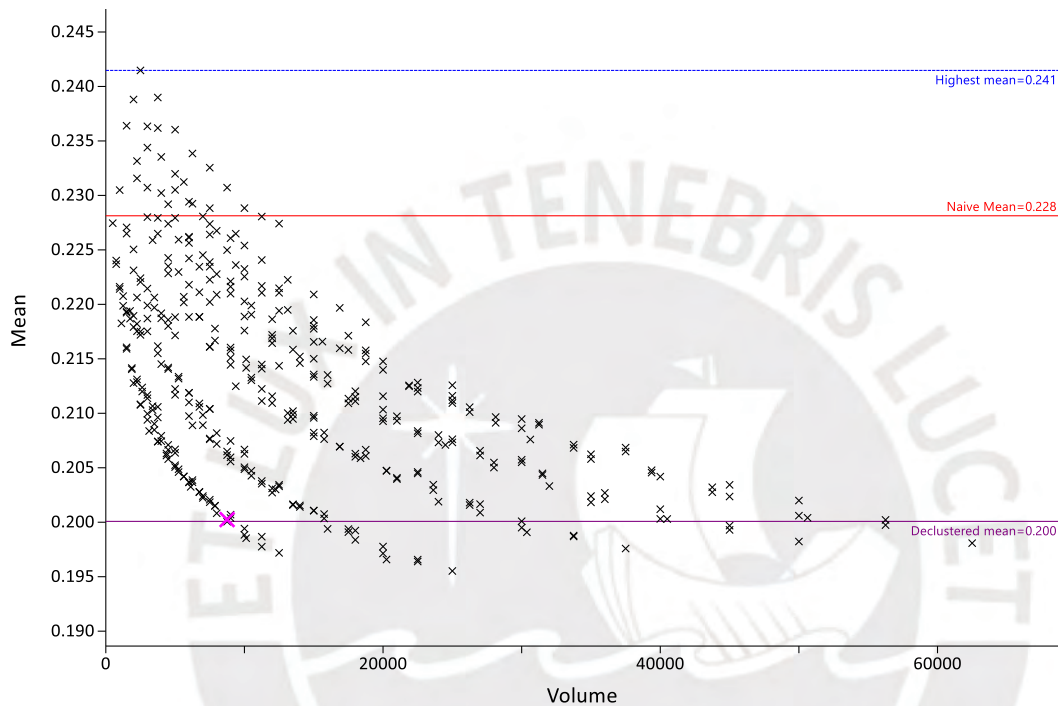
Ilustración 11: Diagrama del Método de Incertidumbre



Nota: Elaboración propia.

Asimismo, la Ilustración 12, muestra un ejemplo del análisis de desagrupamiento de un depósito de oro. Los datos compuestos y meteorizados se desagrupan mediante el método de celdas (paralelepípedos) y el tamaño del volumen se elige a partir de la evaluación del volumen frente a la media.

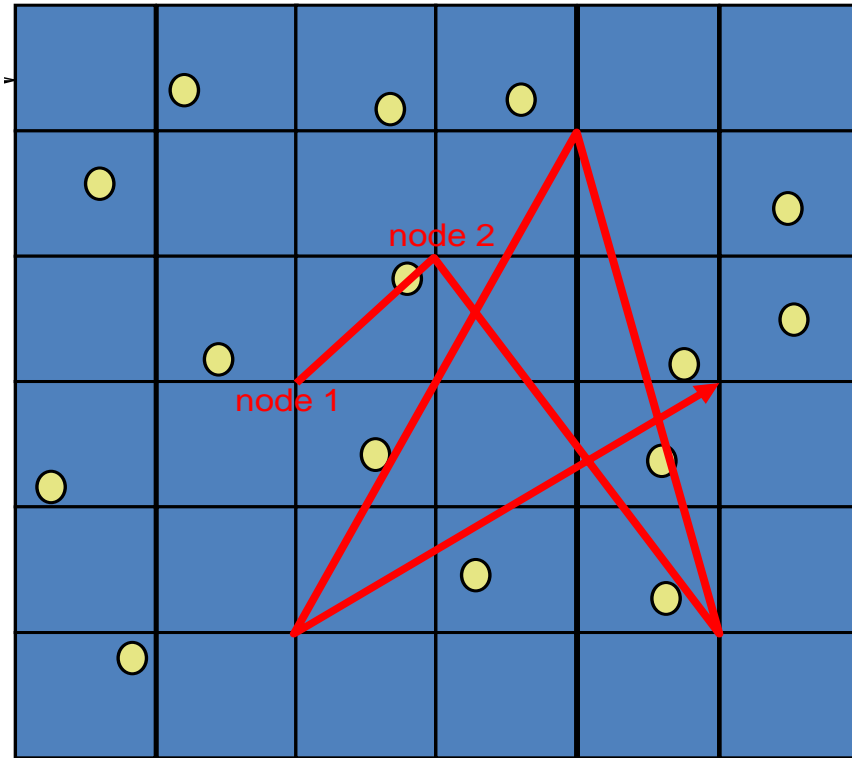
Ilustración 12: Desagrupamiento de ley



Nota: Elaboración propia.

Los datos no agrupados se convierten a una distribución normal con una media de valor cero (0) y una desviación estándar de valor 1, respectivamente. Posteriormente, se va elaborar los variogramas considerando los datos transformados y la ley se simulará en cada uno de estos dominios. La Ilustración 13, muestra una ilustración de la trayectoria aleatoria utilizada para simular la ley en los nodos utilizando datos de muestra (color amarillo) y nodos que ya han sido simulados (color rojo).

Ilustración 13: Trayectoria de Simulación



Nota: (Rondon, 2023)

En el diagrama se muestra el proceso para utilizar el método de simulación condicional gaussiano de la Ley de Oro, junto con el paso de validación que determina si las simulaciones son consistentes.

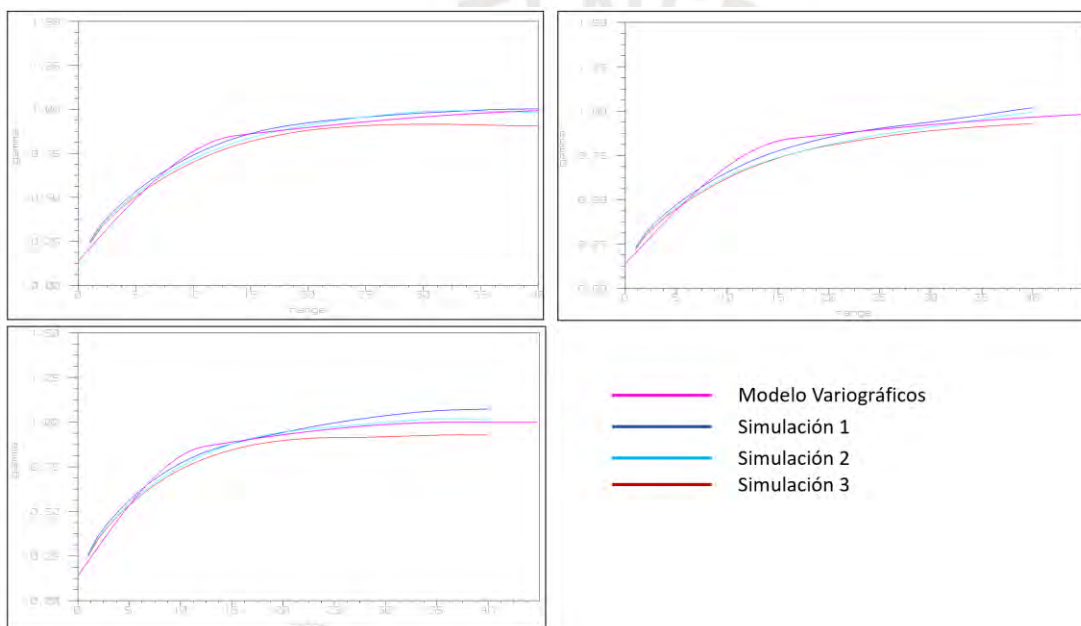
Todas las secuencias de la simulación fueron realizadas a dentro de las aplicaciones desarrolladas en Python que utiliza las librerías de Vulcan denominando Yupay (contar en quechua).

Una comparación de histogramas entre los datos reales y simulados es el primer paso en el proceso de validación de la simulación condicional gaussiana. El propósito de esta comparación es determinar si la proporción de intervalos de grado que comprenden la población original es capturada con precisión por la simulación.

Para evaluar qué tan bien coinciden la variabilidad y continuidad de las leyes originales y las simuladas, la segunda validación compara los variogramas direccionales que se crearon utilizando los datos simulados y los originales (Ver Ilustración 14).

La validación en franjas o parcelas de franjas es otra comparación utilizada para evaluar la distribución espacial de las calificaciones reales y simuladas.

Ilustración 14: Validación de la simulación, variografía original vs. simulados



Nota: Elaboración propia.

Se tiene en cuenta un único precio del oro a lo largo de todo el proceso de evaluación, junto con una geometría de mineralización con límites fijos. Cada uno de los 60 escenarios incluye el cálculo del valor del bloque, seguido, se determinan los bloques que cumplen con un corte específico en cada uno de los 60 escenarios.

1.8.2. Evaluación del nivel de la Incertidumbre de las variables

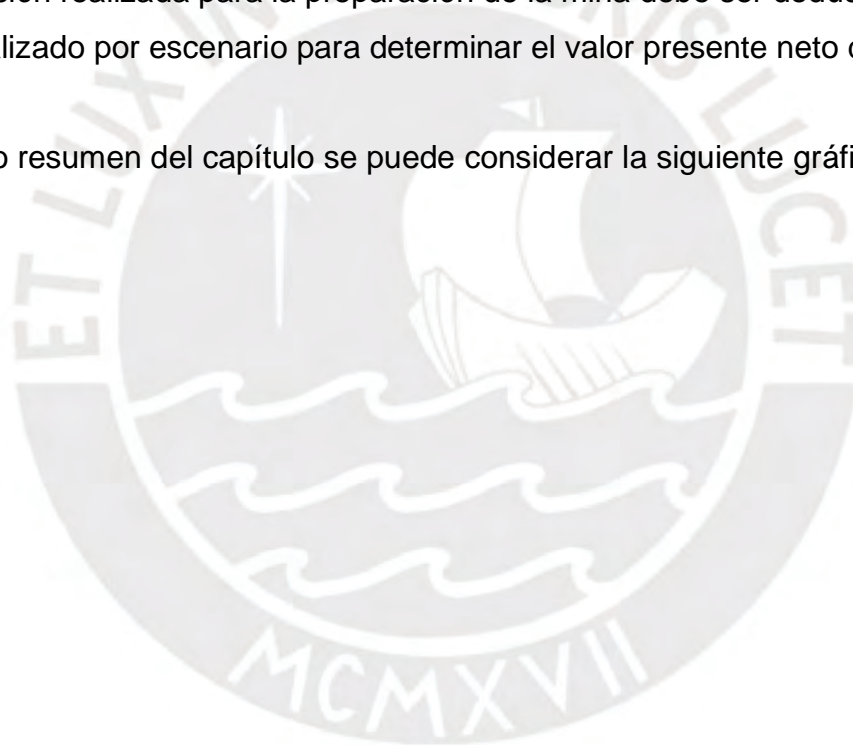
La incertidumbre combinada de la variable geológica (Ley de Oro) fue evaluada económicamente para el plan de minado. El proceso de simulación de Ley de Oro (60 escenarios).

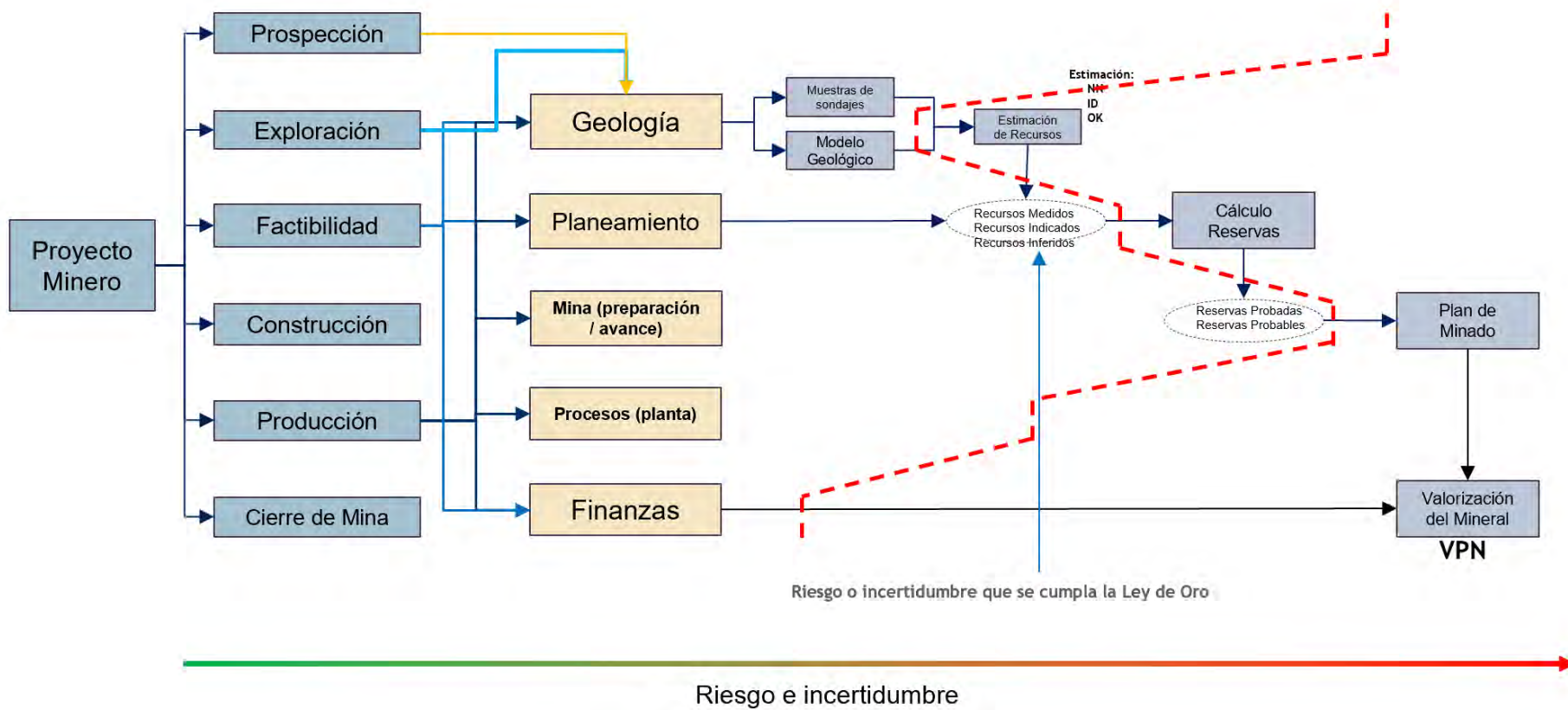
Finos (Au Oz) = tonelaje* Ley_i

Donde: $p_i \rightarrow i$ es número de escenarios (60)

Para determinar el margen económico alcanzado a lo largo del proyecto, se suma el valor actualizado de los bloques en cada uno de los 60 escenarios. La inversión realizada para la preparación de la mina debe ser deducida del valor actualizado por escenario para determinar el valor presente neto del proyecto.

Como resumen del capítulo se puede considerar la siguiente gráfica:





Nota: Elaboración propia.

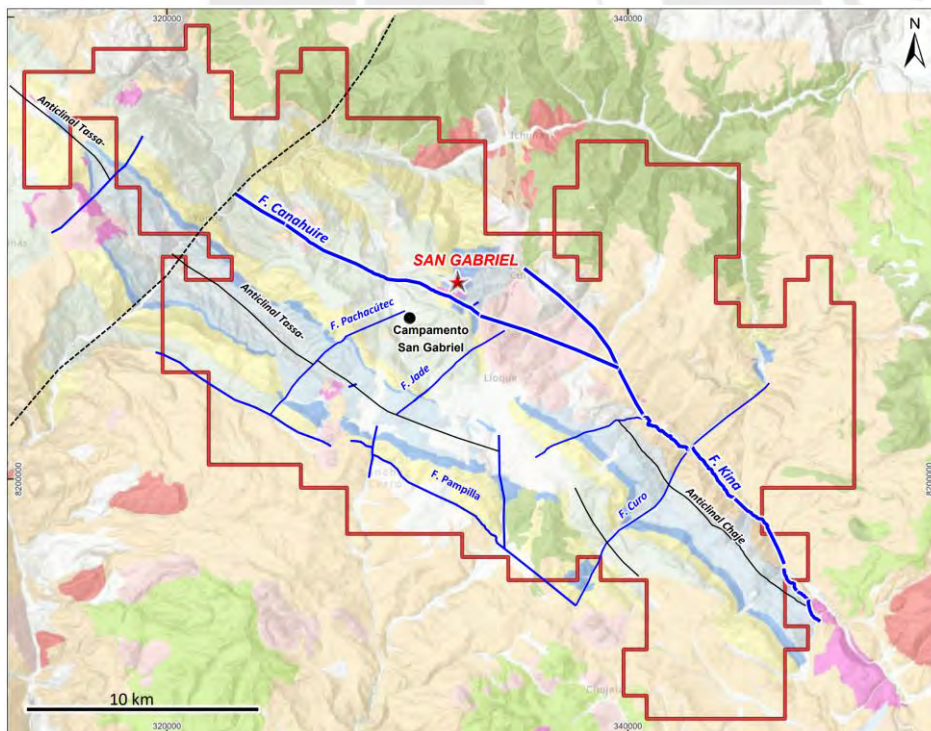
CAPÍTULO II: DESARROLLO DEL PROBLEMA– MINA SUBTERRÁNEA

2.1. Geología del proyecto de estudio

El proyecto se ubica en una secuencia plegada silicoclástica y calcárea del Grupo Yura de rumbo NW, que estaría levantado por una falla y que la pone en contacto con volcánicos del Grupo Tacaza. Secuencia intruida por domos y cortada por brechas.

Con respecto al modelo estructural está conformada por fallas de rumbo andino y tensionales trasandinas y los cuales son: El Sistema de fallas Andinas (falla Pampilla, falla Kina, falla Tassa-Yunga y falla Canahuire Sur) y tensionales trasandinas (falla Pachacútec, falla Jade y falla Curo). (Ilustración 15).

Ilustración 15: Plano estructural



Nota: *Elaboración propia.*

Geología del proyecto

El depósito del proyecto es un sistema de tres brechas: la de mayor volumen es monomíctica clasto soporte, que es cortada por estructuras y cuerpos de brechas, Polimíctica matriz soporte, la tercera brecha es Freatomagmática y corresponde al evento final. Estas se hospedan en las formaciones Labra, Gramadal y Hualhuani; Estructuralmente, están delimitadas por un “jog” (estructuras que se forman a lo largo de una zona de cizalla) de 1.4 x 0.3 km, que son controladas por las fallas andinas Canahuire Sur y Canahuire Norte y las fallas trasandinas Gabriel Norte y Gabriel Sur.

La alteración principal son carbonatos que según el análisis con el Terraspec corresponden a Dolomita-Fe y Ankerita y se encuentran en tres estilos:

- Reemplazamiento de fragmentos calcáreos.
- Matriz de brechas.
- Fracturas.

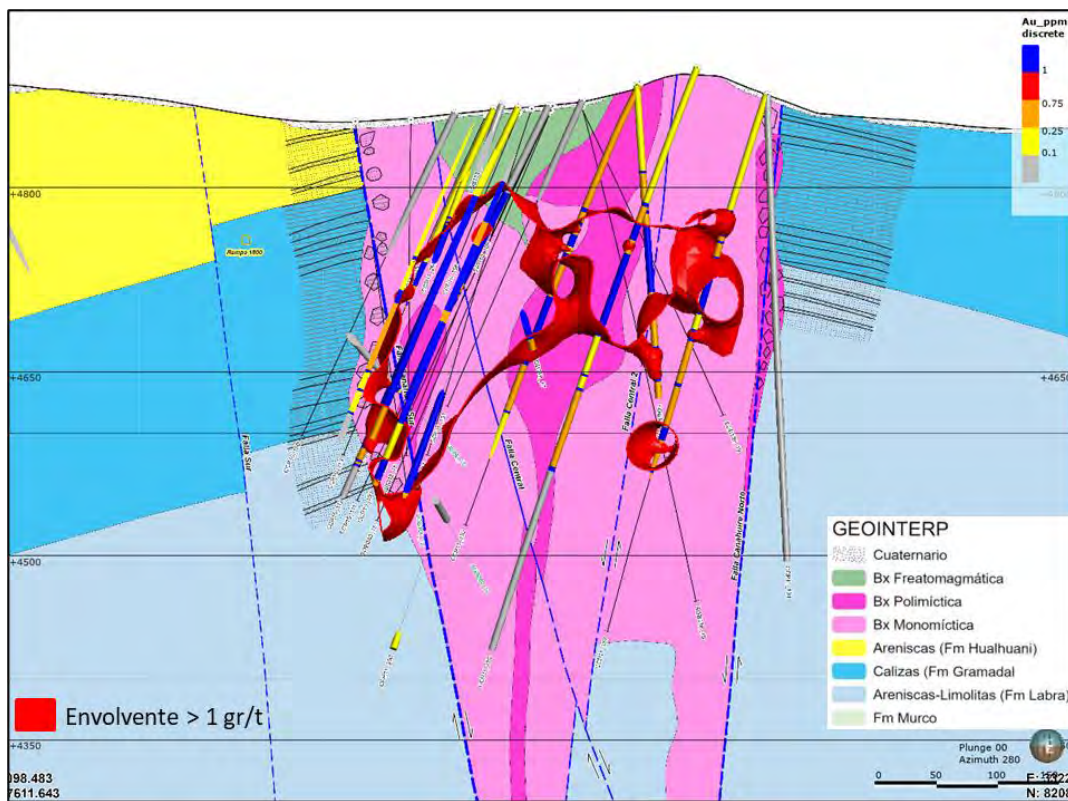
La mineralización está distribuida en los sectores: San Gabriel Sur y San Gabriel Norte:

- San Gabriel Sur, relacionado al conducto y falla principal Canahuire Sur, a través de la cual se emplazan estructuras y cuerpos de brechas sub verticales antitéticas con 60° de inclinación promedio, donde se emplaza el mayor volumen de mineralización y la mejor Ley de Au.
- San Gabriel Norte, asociado al borde de la brecha polimíctica con menor volumen de mineralización de Au y geometría subhorizontal. La mineralogía de mena es pirita y arsenopirita; y las gangas son carbonatos y sílice masiva blanca a hialina (Ilustración 16).

El modelo geológico comprende siete dominios litológicos: tres de brechas, diferenciadas entre polimícticas y monomícticas y, cuatro formaciones sedimentarias. Para la estimación de recursos, el detalle de los cuerpos de brecha polimícticas y

monomícticas por su naturaleza irregular fueron agrupadas en un único sólido principal y como dominio único de la mineralización del depósito (Ilustración 16), dentro del cual se observa dos tipos de geometría en la mineralización; sub vertical en San Gabriel Sur asociado a la falla Canahuire Sur y sub horizontal en San Gabriel Norte asociado a la brecha polimíctica central.

Ilustración 16: Sección geológica y económico



Nota: Elaboración propia.

2.2. Validación y estudio exploratorio

La base de datos contiene información de 616 sondajes (collar, sondeo, ensayo, muestras, densidad, registro).

Tabla 4: Base de Datos utilizada

Phases	Dates	Drillholes	Samples
First	2008-2012	502	93,234
Second	2016-2019	114	14,900
Total	2008-2019	616	108,134

Nota: Elaboración propia.

Se construyeron seis dominios para el oro (Tabla 05, describe el código de la zona sur y norte). Con base en la interpretación geológica, el control estructural y litología, se definió los dominios de estimación para dos zonas, sur y norte (dominio 3 y 6, respectivamente); y se consideraron grade Shell dentro del dominio litológico de brecha a diferentes cutoff.

Se han utilizado diferentes leyes de corte para determinar los límites envolventes para la estimación de Oro, esto refleja las diferencias en la continuidad de las leyes entre zonas mineralizadas.

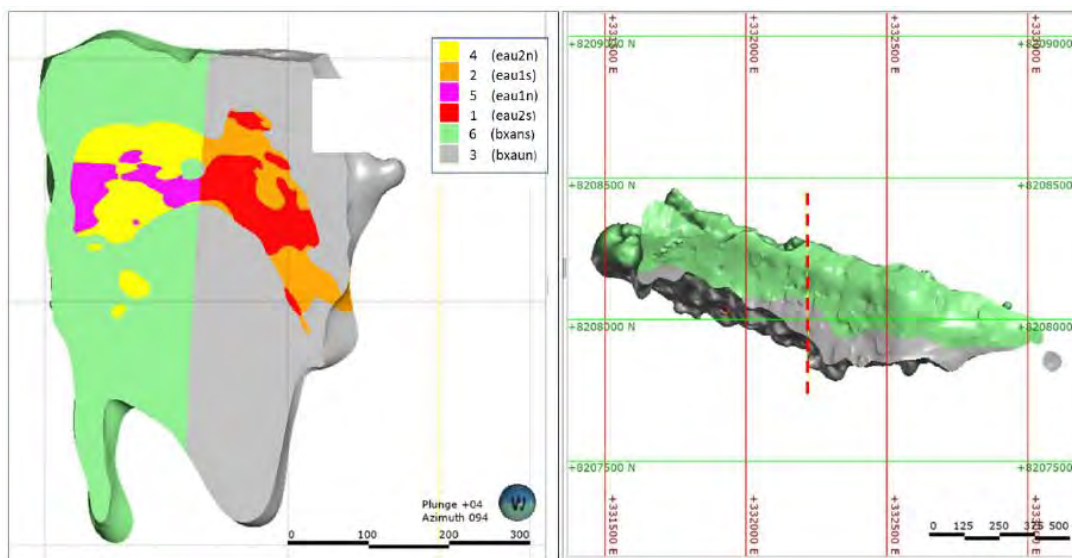
Se delimitó probabilísticamente el modelado como primer control (estructural). El segundo control fue determinista y se construyeron grade shell de Ley de 1 ppm de Au, subdominio 2 en el sur y subdominio 4 en el norte, para cada tipo de mineralización (brechas y estructuras), figura 1. Además, se consideraron varios depósitos de ley extra que involucraban Leyes de Au, con una ley de corte de 2 ppm (subdominio 3 en el sur y subdominio 5 en el norte).

Tabla 5: Códigos por zonas

Zone	Domain	Name	Subdomain	Cut-off Grade (g/t Au)	Description
San Gabriel South	3	South Breccia (bxaus)	2 (eau1s)	1	GradeShell South (1 g/t)
			1 (eau2s)	2	GradeShell South (2 g/t)
San Gabriel North	6	North Breccia (bxaun)	4 (eau2n)	1	GradeShell North (1 g/t)
			5 (eau1n)	2	GradeShell North (2 g/t)

Nota: Elaboración propia.

Ilustración 17: Dominios de Oro en las dos zonas



Nota: Elaboración propia.

La estimación de Recursos Minerales se basa en la interpretación geológica para cada cuerpo mineralizado a partir de los resultados del análisis de muestreo de los sondajes, considerando los controles estructurales y litológicos en 3D utilizando los softwares Leapfrog y Vulcan.

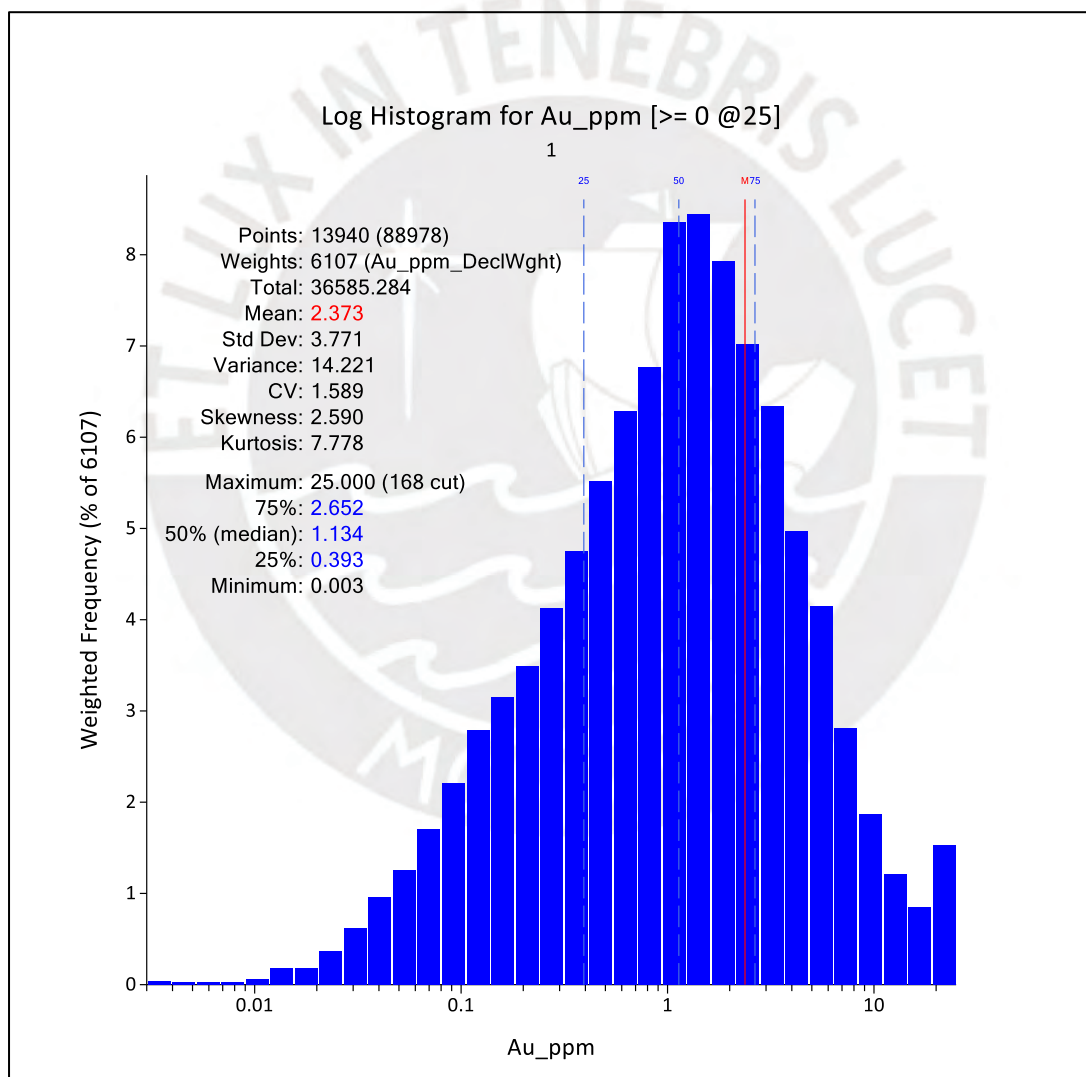
Las rocas y estructuras anfitrionas son los principales controles de la geometría, ley y estilo de mineralización. La zonación vertical en las zonas mineralizadas está fuertemente controlada por litología, mientras que los límites laterales están definidos por fallas y brechas relacionadas con la extensión oblicua. Las zonas de mayor ley dominadas por el reemplazo hidrotermal se encuentran en las intersecciones de fallas y horizontes de piedra caliza fosilífera de grano más grueso.

La calidad del modelado 3D depende de las leyes y de la estacionariedad de los dominios, dentro de los cuales se espera una distribución relativamente homogénea de la ley en términos de variabilidad media y espacial. Estos dominios pueden determinarse de manera determinista a través del conocimiento geológico o probabilísticamente utilizando herramientas estadísticas o una combinación de ambos.

El depósito del proyecto ha sido subdividido en dos sectores (Norte y Sur), en cada uno de los sectores se realizaron los análisis exploratorios de los datos para la Ley de Au. La subdivisión del depósito obedece principalmente a la geometría y dirección de la mineralización.

La Ilustración 18 muestra el histograma de Au (g/t) del dominio Norte, donde el CV es 1.589.

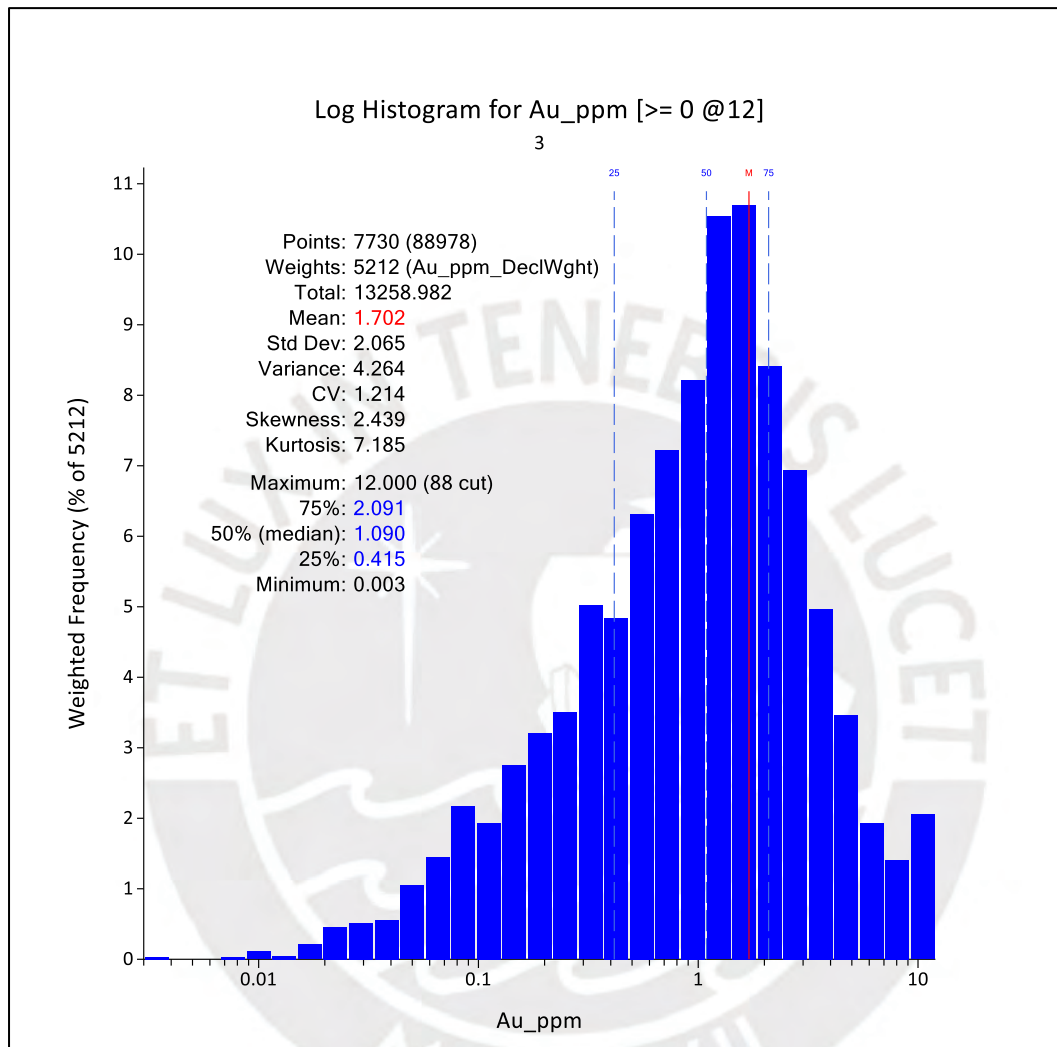
Ilustración 18: Histograma de Au (g/t) dominio Norte



Nota: Elaboración propia.

La Ilustración 19 muestra el histograma de Au (g/t) del dominio Sur, donde el CV es 1.214.

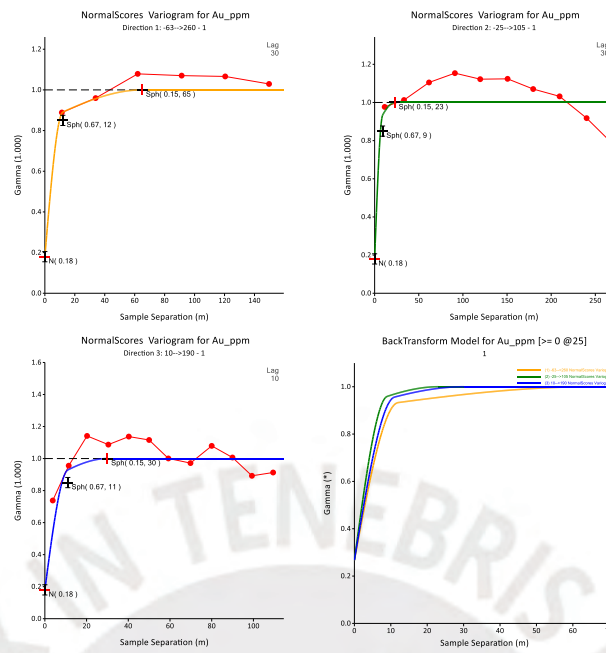
Ilustración 19: Histograma de Au (g/t) dominio Sur



Nota: Elaboración propia.

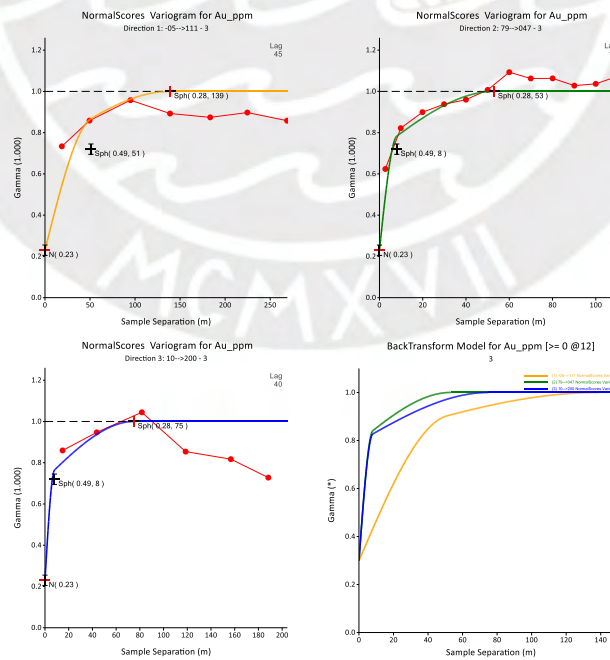
También se realizó el análisis variográfico de cada dominio para el Au (g/t), las Ilustraciones 20 y 21 muestran los análisis variográficos del Au en el dominio Norte y Sur, respectivamente.

Ilustración 20: Variograma de Au del dominio Norte



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 21: Variograma de Au del dominio Sur



Nota: Elaboración propia.

Cabe señalar que el análisis variográficos de la base de datos tiene como finalidad de poder realizar la desagrupación de datos que se requieren para el proceso de la simulación condicional y el análisis variográficos gaussiano.

Los criterios de categorización para Recurso medido son:

- Distancia máxima de los 3 taladros más cercanos al bloque es igual a 15 metros.
- Número mínimo de sondajes considerados dentro de la estimación igual a 3.

Los criterios de categorización para Recurso indicado son:

- Distancia máxima de los 3 taladros más cercanos al bloque es igual a 36 metros.
- Número mínimo de sondajes considerados dentro de la estimación igual a 2.

Los criterios de categorización para Recurso inferido son:

- Distancia máxima de los 3 taladros más cercanos al bloque es igual a 60 metros.
- Número mínimo de sondajes considerados dentro de la estimación igual a 1.

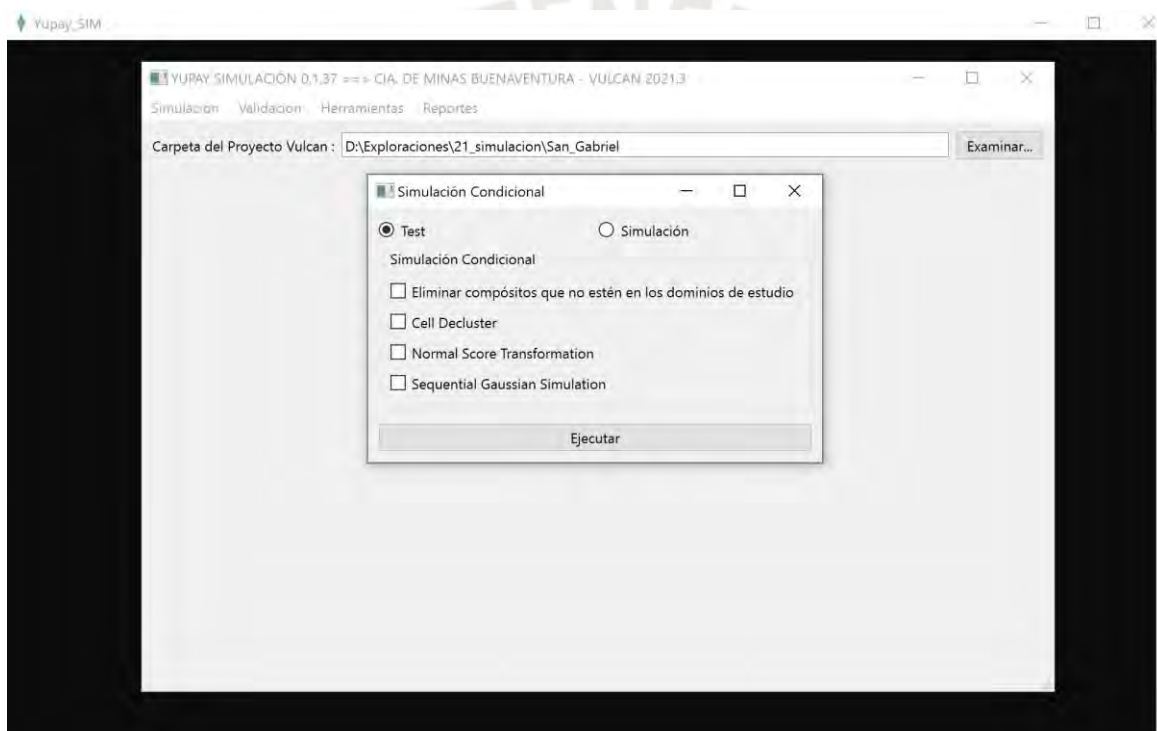
2.3. Modelo de simulación condicional

Primero, los datos deben transformarse en la distribución dentro del plano gaussiano con varianza 1 y media 0 para poder utilizar el método gaussiano secuencial, que se utiliza para realizar la simulación condicional. Por lo tanto, para cada uno de los dominios económicos (plan de minado anual) mencionados anteriormente, procedemos a realizar la transformación gaussiana y posteriormente, el análisis variográficos gaussiano de los datos en esta sección.

El proceso de simulación que se trabaja para esta investigación es con el Yupay (Ver Ilustración 21). Este es un aplicativo de scripting en lenguaje Python para automatizar tareas que realizan con Maptek-Vulcan.

Tiene una interfaz de usuario que permite su ejecución fuera del entorno de Vulcan, para esto se requiere que Maptek Vulcan esté instalado con una licencia válida ya que hace uso de la funcionalidad del Vulcan.

Ilustración 22: Vista del Yupay -SIM para Testear



Nota: Elaboración propia.

Como archivos de entrada se utiliza los siguientes parámetros para realizar el testeado de la simulación:

Tabla 6: Base de datos

Nombre	Unidad	Nombre Campo	Campo Envolvente	Base de Datos
Au	PPM	AUPPM	VETA	bvn_au.cmp.isis

Nota: Elaboración propia.

Decluster

Tabla 7: Decluster

Metal	Dominio	X	Y	Z	lower_cut_value	upper_cut_value
Au	10	55	20	60	0.05	300
Au	20	20	50	45	0.02	50
Au	30	60	60	20	0.003	20
Au	40	45	20	55	0.017	40
Au	50	45	25	55	0.01	15
Au	60	50	55	25	0.003	20

Nota: Elaboración propia.

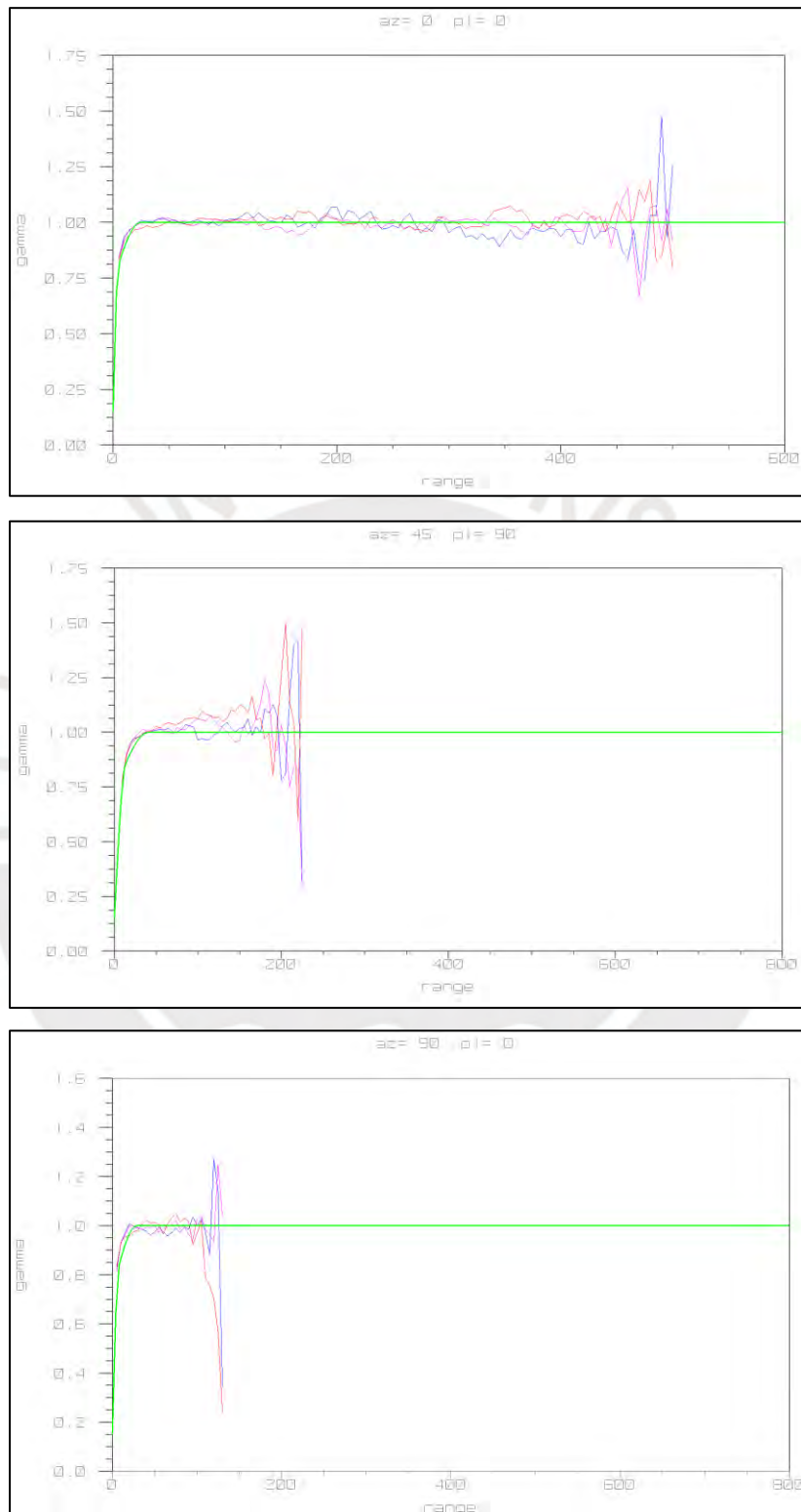
Tabla 8: Variograma y plan de estimación

Metal	Dominio	Eje Mayor	Semi Eje Mayor	Eje Menor	Min Samples	Max Samples	Max Presimulated	Semilla	NS Min Value	NS Max Value	Upper w value	Post Simulation Cutoff
Au	10	125	75	125	2	16	8	2601	0	300	1.51	1.63
Au	20	125	100	50	2	12	6	3015	0	50	1.35	1.63
Au	30	150	70	50	2	18	9	5580	0	20	0.28	1.63
Au	40	120	90	90	2	18	6	3754	0	40	0.86	1.63
Au	50	120	40	25	6	9	4	5580	0	10	1.33	1.63
Au	60	150	120	120	2	14	7	3754	0	20	1	1.63

Metal	Dominio	Nugget	Str1 Sill	Str1 Bearing	Str1 Plunge	Str1 Dip	Str1 Major	Str1 Semi	Str1 Minor	Str2 Sill	Str2 Bearing	Str2 Plunge	Str2 Dip	Str2 Major	Str2 Semi	Str2 Minor
Au	10	0.15	0.58	85.506	-67.731	-62.727	17	12	4	0.27	85.506	-67.731	-62.727	46	30	23
Au	20	0.12	0.64	90	0	-50	10	7	3	0.24	90	0	-50	39	29	8
Au	30	0.11	0.39	340	70	0	57	51	30	0.5	340	70	0	317	158	113
Au	40	0.03	0.7	85.038	-8.649	-59.619	20	6	4	0.265	85.038	-8.649	-59.619	85	52	35
Au	50	0.12	0.74	73.435	14.478	-26.565	18	18	13	0.22	73.435	14.478	-26.565	192	70	50
Au	60	0.11	0.31	90	0	-70	81	50	58	0.58	90	0	-70	571	196	229

Nota: Elaboración propia.

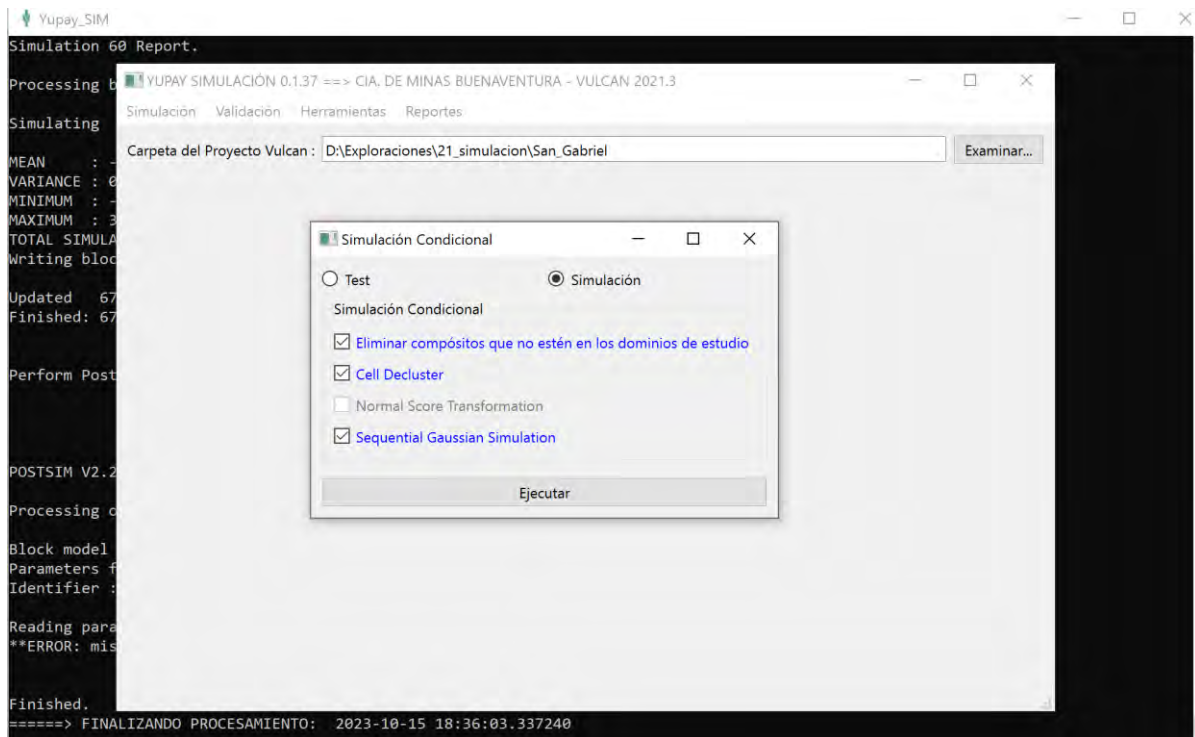
Ilustración 23: Validaciones de la simulación antes de correr los 60 escenarios: Validación entre la variografía kriging ordinario Vs Simulaciones (direcciones Az:0, pl:0; Az:45, pl:90; Az:90, pl:0)



Nota: Elaboración propia.

Una vez hecho las validaciones, procedemos a ejecutar los 60 escenarios:

Ilustración 24: Título Vista del Yupay -SIM para Simulación (60 escenarios)

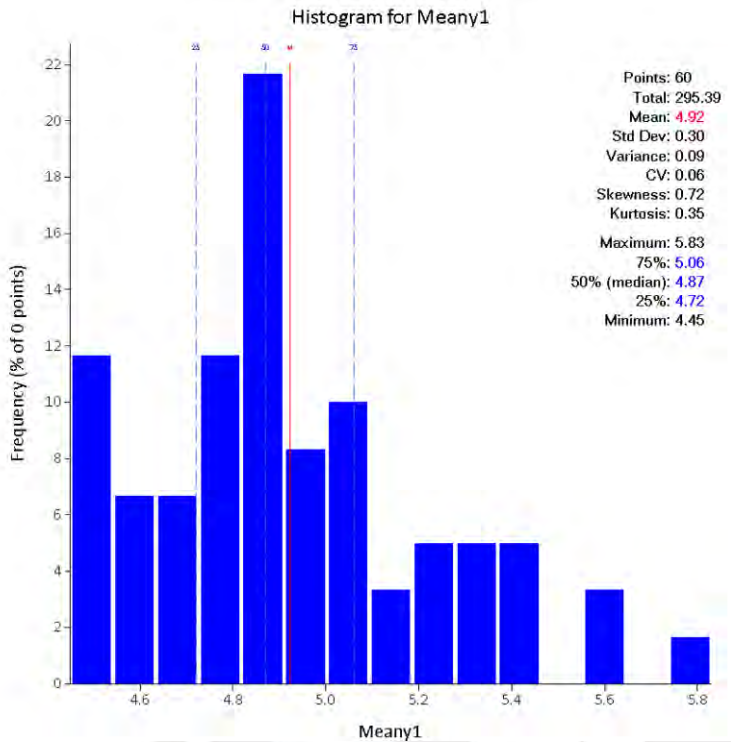


Nota: Elaboración propia.

2.4. Análisis de riesgo e incertidumbre para la Ley de Oro

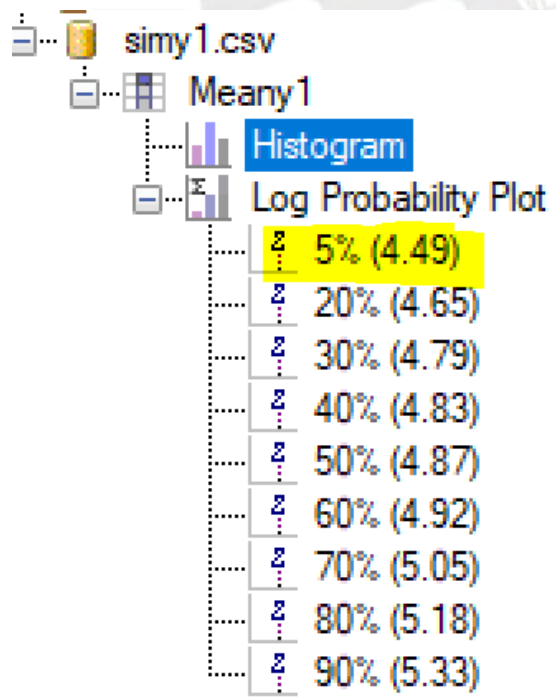
Para realizar el análisis se requiere que la Ley de Oro, se una variable aditiva; por lo tanto, se va a calcular la cantidad de onzas de Au por los 05 primeros años.

Ilustración 25: Histograma del año 01



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 26: Valor seguro (safe value) al 95%



Nota: Elaboración propia.

Se procedió a realizar un cuadro resumen con los datos obtenidos en el software supervisor, (Tabla 9).

Tabla 9: Resumen de Datos del Software Supervisor

	Safe value (5%)	E(npv) median	Objetivo KO (Au)
Año 01	4.49	4.87	4.94
Año 02	4.2	4.68	4.94
Año 03	4.03	4.54	5.62
Año 04	3.66	4.05	4.7
Año 05	3.94	4.5	4.16

Nota: Elaboración propia. Análisis

A continuación, plan de minado por año considerando la estimación de los recursos con el kriging Ordinario / Inverso a la distancia.

Tabla 10: Plan de Minado considerando las Onzas de Au por año

Metodo Minado	Data	Año 01	Año 02	Año 03	Año 04	Año 05
Grand Total	Ton Rec	1,093,281	1,096,254	1,093,259	1,093,193	1,097,493
Grand Total	Au Dil	4.94	4.94	5.61	4.7	4.16
Grand Total	Ag Dil	4.26	3.85	4.43	4.75	4.59
Grand Total	Cu Dil	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
Grand Total	NSRTOTDIL	220	219	243	202	184
Grand Total	Rec Au Dil	87%	86%	84%	84%	86%
Grand Total	Rec Ag Dil	48%	48%	47%	47%	47%
Onzas Au		173,640	174,112	197,186	165,191	146,786

Nota: Elaboración propia.

2.5. Resultados

El valor del bloque se calcula según la formula:

$$\text{Finos (Au_Oz)} = \text{Ton} * \text{Ley}$$

Donde:

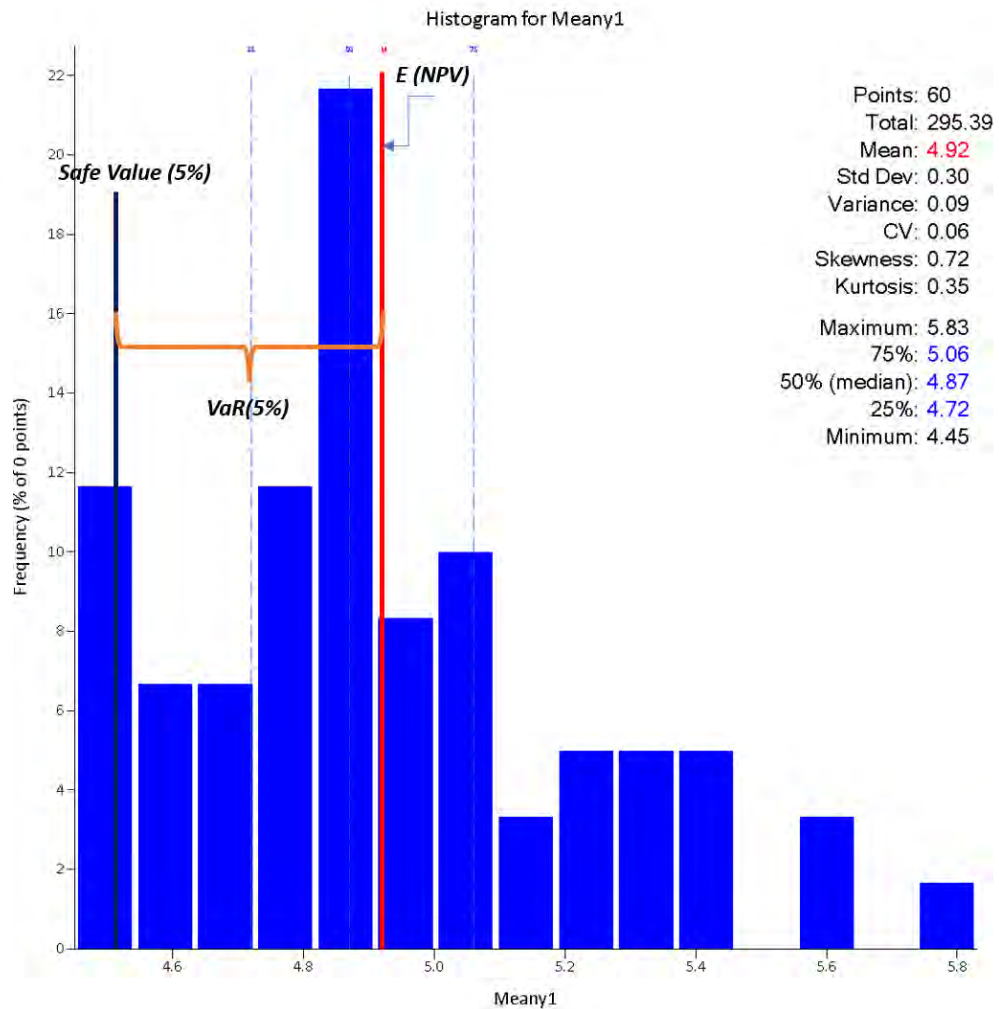
Au_Oz → finos de Oro

ton → tonelaje

Ley → Ley de Oro

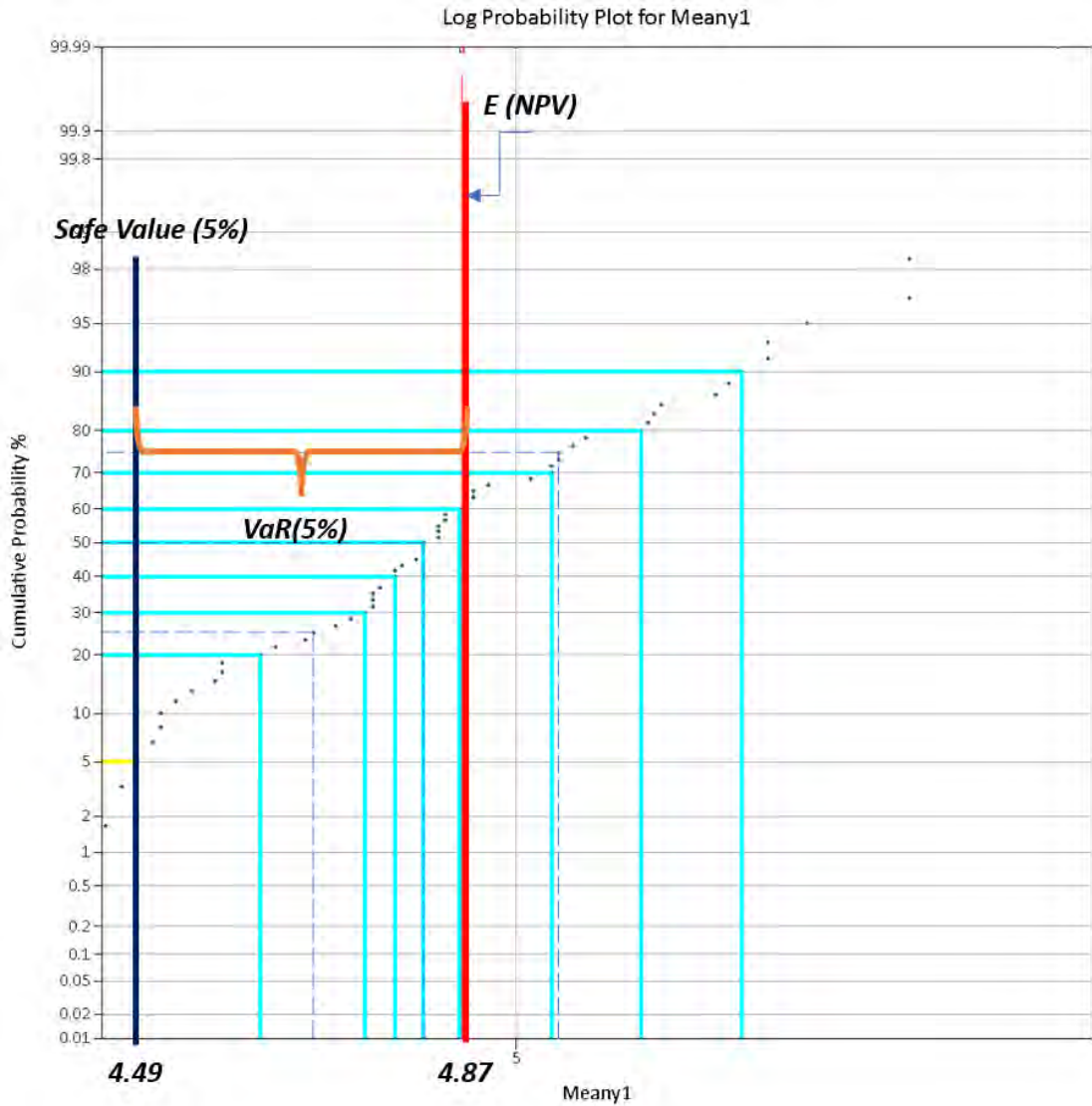
Se va a evaluar el valor del riesgo de la Ley de Oro, esta será convertido en onzas y, a continuación, se va a considerar las fórmulas propuestas:

Ilustración 27: Histograma y Variables a Considerar



Nota: Elaboración propia.

Ilustración 28: Curva Probabilística del primer año



Nota: Elaboración propia.

$$\text{VaR (5\%)} = E(\text{NPV}) - \text{Safe Value (5\%)}$$

$$\text{DVaR (5\%)} = \text{Objetivo} - \text{Safe Value (5\%)}$$

$$\text{PVaR (\%)} = \text{DVaR (5\%)} / \text{Objetivo}$$

Tabla 11: Resumen de PVaR por año

	Tonelaje	Safe value (5%) Oz	E(npv) median Oz	Objetivo KO (Au Oz)	VaR (5%)	DVaR (5%)	PVaR (5%)
Año 01	1,093,280	4,908,827	5,324,274	5,400,803	415,446	491,976	9.1%
Año 02	1,096,254	4,604,267	5,130,469	5,415,495	526,202	811,228	15.0%
Año 03	1,093,259	4,405,834	4,963,396	6,133,183	557,562	1,727,349	28.2%
Año 04	1,093,193	4,001,086	4,427,432	5,138,007	426,345	1,136,921	22.1%
Año 05	1,097,493	4,324,122	4,938,719	4,565,571	614,596	241,448	5.3%

Nota: Elaboración propia.

Se va a considerar la Probabilidad del Valor en riesgo dentro de los siguientes casos:

- Caso 1: Plan de minado convencional

Tabla 12: Plan de Minado actual

Metodo Minado	Data	Año 01	Año 02	Año 03	Año 04	Año 05	Grand Total
Grand Total	Ton Rec	1,093,281	1,096,254	1,093,259	1,093,193	1,097,493	5,473,480
Grand Total	Au Dil	4.94	4.94	5.61	4.7	4.16	4.87
Grand Total	Ag Dil	4.26	3.85	4.43	4.75	4.59	4.38
Grand Total	Cu Dil	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
Grand Total	NSRTOTDIL	220	219	243	202	184	214
Grand Total	Rec Au Dil	87%	86%	84%	84%	86%	85%
Grand Total	Rec Ag Dil	48%	48%	47%	47%	47%	47%
	Onzas Au	173,640	174,112	197,186	165,191	146,786	856,915

Nota: Elaboración propia.

- Caso 2: Plan de minado considerando el análisis de riesgo

Tabla 13: Plan de minado considerando el análisis del riesgo

	Tonelaje	Safe value (5%) Oz	E(npv) median Oz	Objetivo KO (Au Oz)	VaR (5%)	DVaR (5%)	PVaR (5%)	Objetivo_Riesgo
Año 01	1,093,281	157,822	171,179	173,640	13,357	15,817	9.1%	157,822
Año 02	1,096,254	147,629	164,501	174,112	16,872	26,483	15.2%	147,629
Año 03	1,093,259	141,654	159,580	197,186	17,926	55,533	28.2%	141,654
Año 04	1,093,193	128,648	142,357	165,191	13,708	36,542	22.1%	128,648
Año 05	1,097,493	138,490	158,174	146,786	19,684	8,296	5.7%	138,490
								714,243

Nota: Elaboración propia.

Descripción de cada columna de la tabla 13:

Safe value (5%): el valor obtenido de la curva probabilidad (5%) de las 60 simulaciones. Esto para cada año.

E(NPV) median Oz: valor de la mediana extraído de la estadística de las 60 simulaciones.

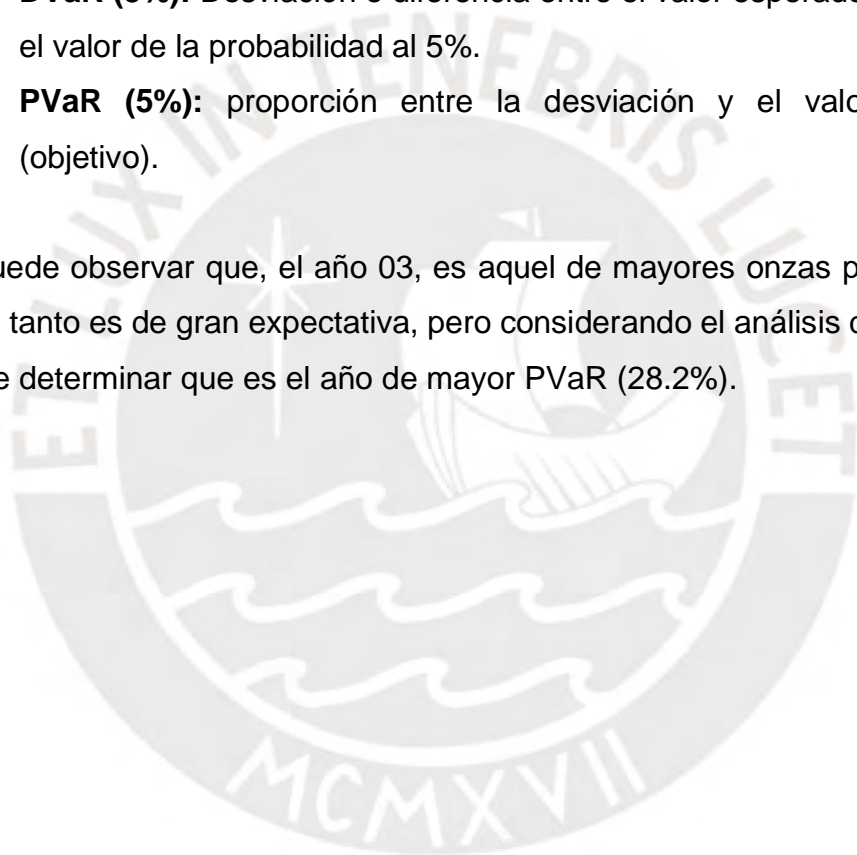
Objetivo KO (Au Oz): el valor que se espera dentro del plan de minado. Este valor fue calculado de la estimación de recursos (kriging Ordinario).

VaR (5%): Es la diferencia entre el mejor valor y valor de la probabilidad 5%.

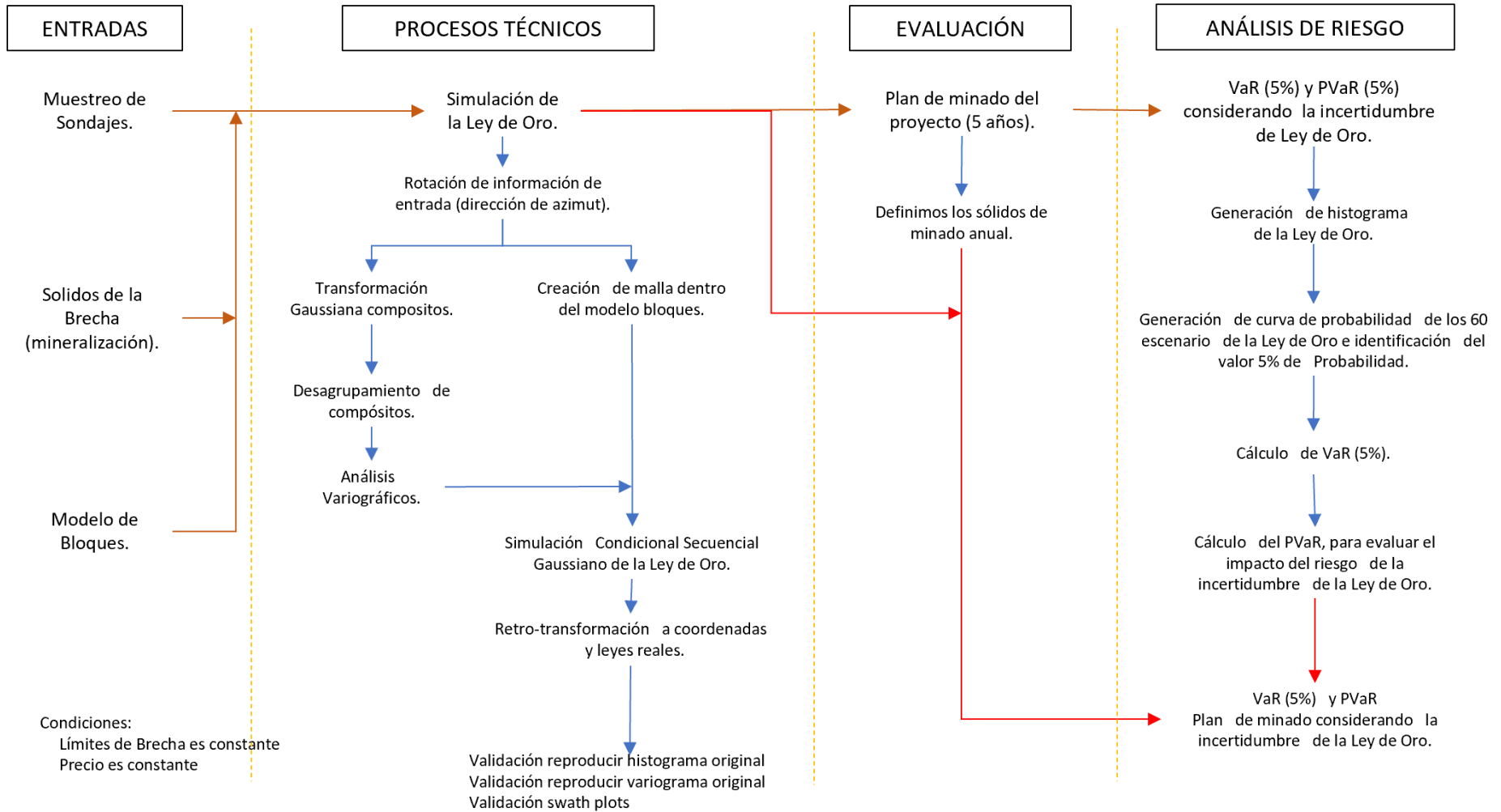
DVaR (5%): Desviación o diferencia entre el valor esperado (objetivo) y el valor de la probabilidad al 5%.

PVaR (5%): proporción entre la desviación y el valor esperado (objetivo).

Se puede observar que, el año 03, es aquel de mayores onzas programadas por lo tanto es de gran expectativa, pero considerando el análisis del riesgo se puede determinar que es el año de mayor PVaR (28.2%).



Como resumen del capítulo se puede considerar la siguiente gráfica:



Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Análisis de los Resultados

- 1) Según la hipótesis considerada en el presente trabajo, sino se hace análisis de riesgo la empresa va a perder onzas de producción o existe la probabilidad alta de pérdida.
- 2) Considerado el análisis de riesgo e incertidumbre en el plan de minado de los primeros cinco años (**payback**), se pudo determinar una pérdida del 17% de onzas de oro. Esto tendría un impacto económico en el valor de la empresa. En tal sentido es necesario tomar acciones para evitar el riesgo de pérdida de valor.
- 3) El plan de minado convencional es calculado a partir de las reservas minerales que forman parte de los recursos minerales que desde el inicio presentan riesgo e incertidumbre. En la Compañía de Minas Buenaventura y en otras empresas del Perú evalúan los recursos minerales utilizando técnicas de estimación lineal más comunes en la industria (Kriging Ordinario e Inverso de la distancia). Después, los recursos se convierten en reservas, las cuales se toman en cuenta al evaluar la viabilidad técnica y financiera de un proyecto mediante un plan de minado. Sin embargo, no consideran qué hacer si el plan de minado no se cumple. Esto se da debido que dentro de la formación universitaria no se tienen herramientas para hacer el análisis de riesgo e incertidumbre, desde el punto de vista geológico.

A continuación, se menciona tres autores que manifiestan la importancia del análisis de riesgo e incertidumbre para elaborar el plan de minado:

- (Valenzuela Saintard, 2013) describe todos los riesgos que se tiene en las etapas o procesos (perforación diamantina, logueo y muestreo, preparación de muestras, análisis químico, administración de base de datos, interpretación y modelamiento geológico, estimación de recursos)

hasta calcular las reservas minerales y finalmente, un plan de minado en un proyecto de inversión.

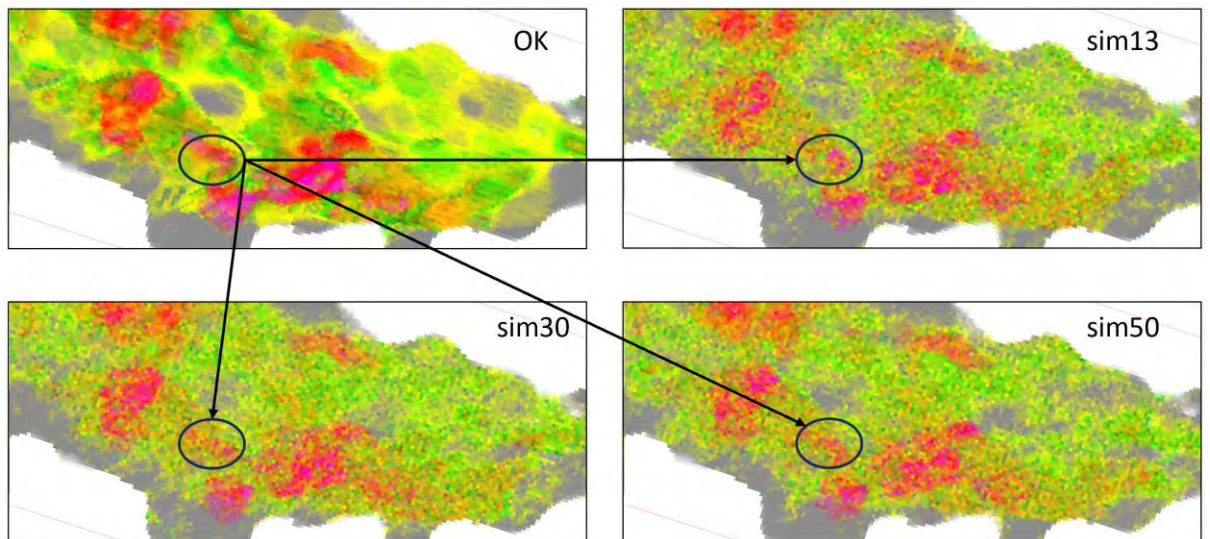
En cada etapa se considera el análisis de riesgos e incertidumbre de las diferentes variables; sin embargo, la información es escasa de las fuentes de origen. Esto ayudó a identificar que las variables utilizadas para el cálculo de las reservas tienen riesgo e incertidumbre, por lo tanto, en el plan de minado ya se debería cuantificar los riesgos.

- (Munizaga Rosas, 2018) hace mención que existe una metodología para determinar el riesgo de una variable considerando un objetivo (VaR). Por ello, esto debería ser divulgado en la industria, sobre todo en las áreas de Planeamiento y Geología. Para la presente investigación, esto facilitó para determinar la variabilidad de las onzas de oro considerando el análisis de riesgo.
- (Gutiérrez Ramírez, 2022) considera tres variables que impactan directamente al tonelaje: la ley, densidad y volumen o geometría de la mineralización. Además, hace el análisis de riesgo e incertidumbre de cada uno y el impacto que se tendrá en el VPN. Al cuantificar los posibles impactos de la incertidumbre de las variables geológicas permitió determinar el riesgo que estaría asociado al plan de minado y sobre todo qué plan de acción se puede considerar en esta investigación.

3.2. Malla óptima de perforación

Se determinó que el plan de minado del año 03 tiene PVaR más alto, esto quiere decir que hay 28.2% de la probabilidad que la Ley de Oro se cumpla dentro del plan de minado. Para esto se usará los 60 escenarios de la simulación y el análisis del Kriging Ordinario (KO). A continuación, una comparación visual:

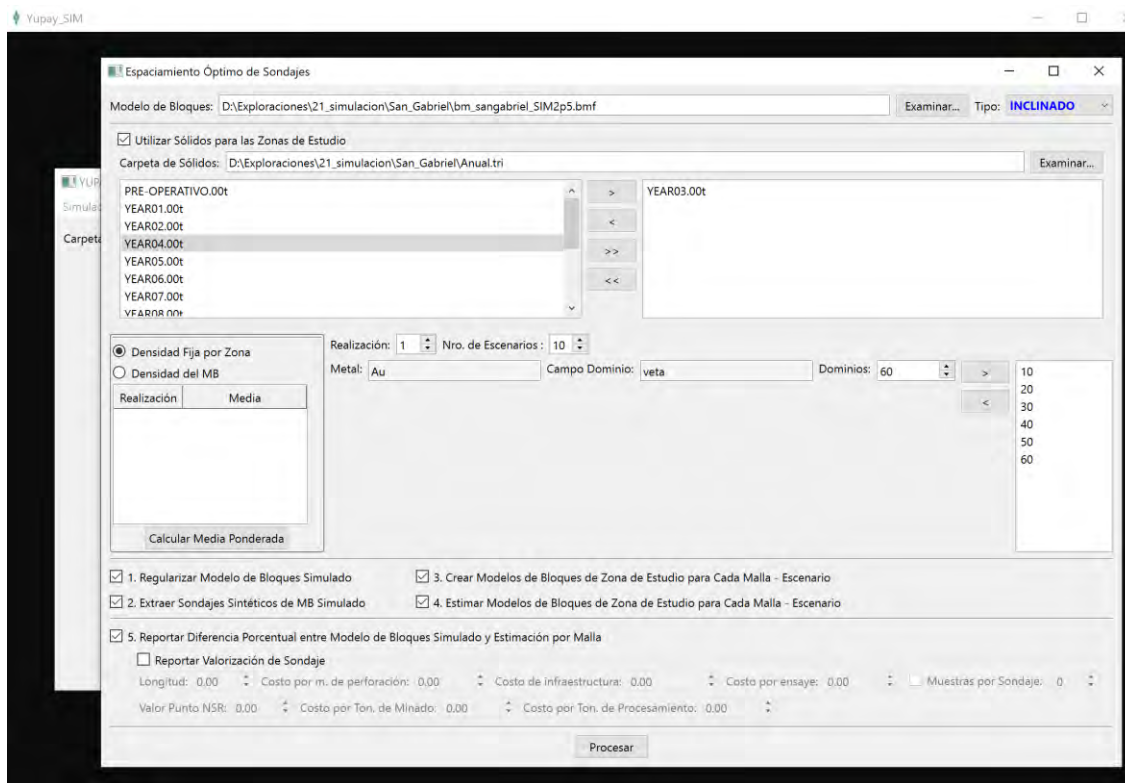
Ilustración 29: Comparación de simulación 13,30 y 50 vs Kriging Ordinario (KO)



Nota: Elaboración propia.

De la misma manera que en el proceso de simulación, para la malla óptima se va a utilizar el software Yupay, para buscar escenarios a diferentes mallas: 10*10, 15*15, 20*20, 25*25, 30*30, 35*35, 40*40, 45*45, 50*50, 55*55, 60*60, 65*65 y 70*70.

Ilustración 30: Vista del Yupay para malla de Optima de Sondajes

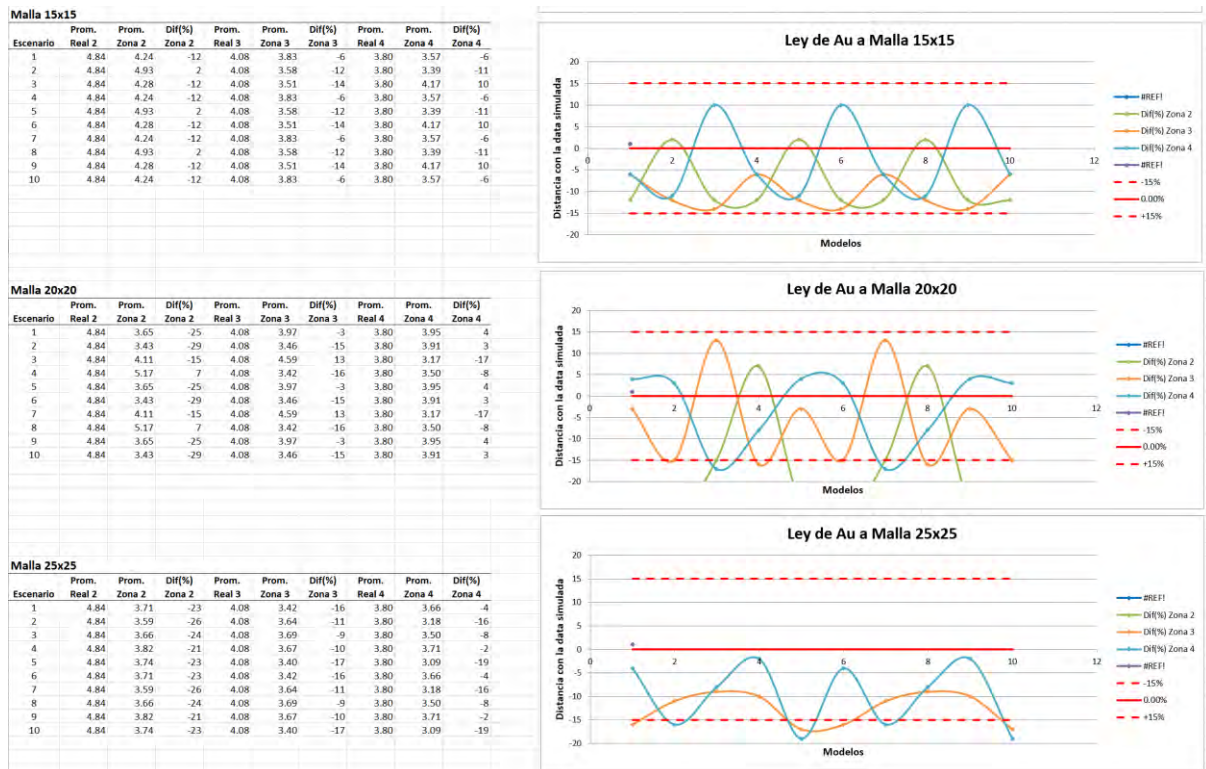


Nota: Elaboración propia.

El proceso en mención tiene cinco pasos:

- 1) Regularizar modelo de bloques simulado.
- 2) Extraer sondajes sintéticos de MB simulado.
- 3) Crear modelo de bloques de zona de estudio para cada malla – escenarios.
- 4) Estimar los Modelos de bloques de zona de estudio para cada malla – escenario.
- 5) Reporte de diferencia entre modelo de bloques simulados y estimación por malla.

Ilustración 31: Análisis a diferentes mallas



Nota: Elaboración propia.

En la actualidad se viene perforando según la malla:

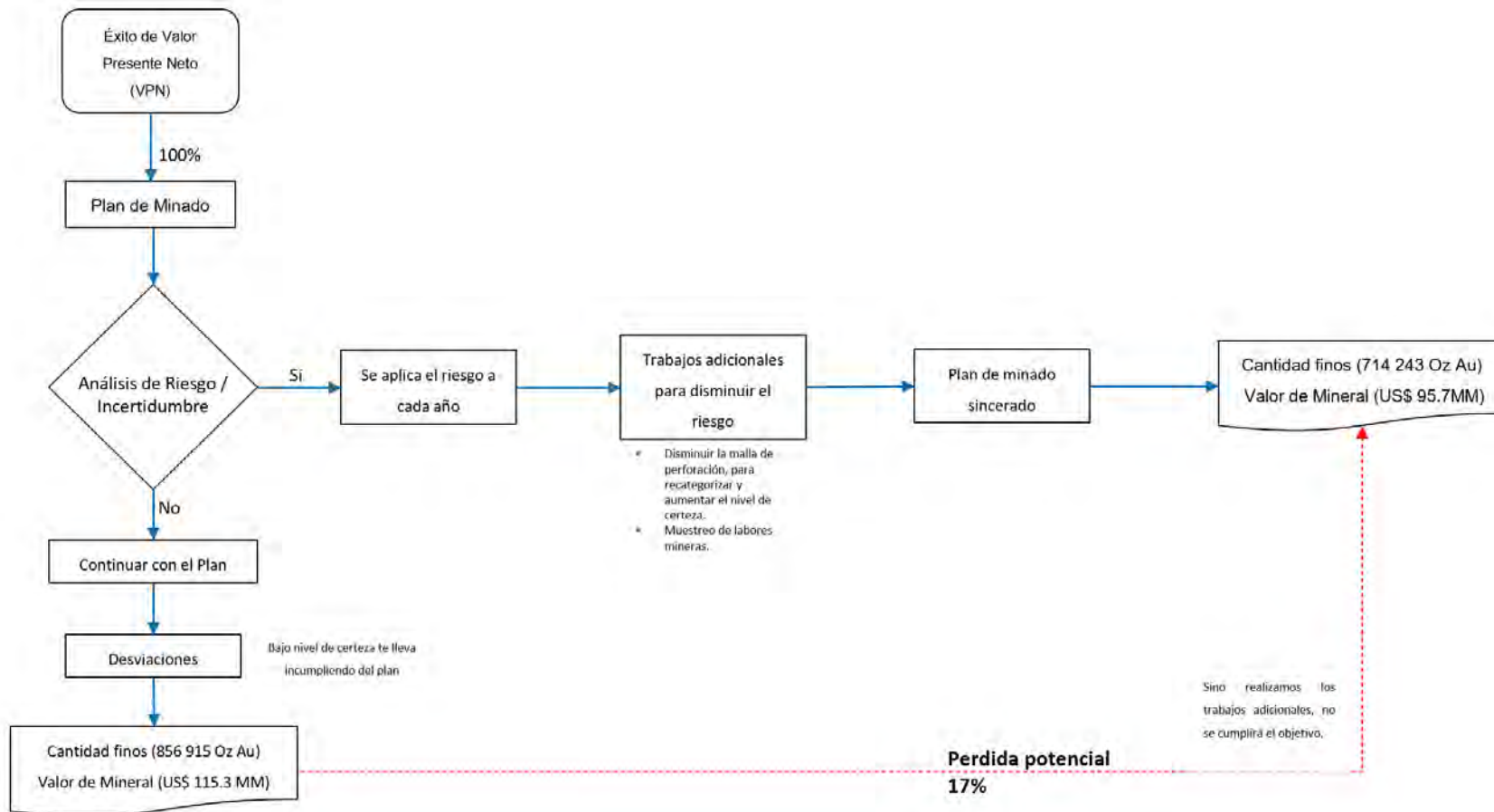
Recurso Medido: Distancia 0 a 15 metros.

Recurso Indicado: Distancia 15 a 36 metros.

Recurso Inferido: Distancia 36 a 60 metros.

Según el análisis realizado a la malla óptima de perforación, se puede considerar una malla de 15 a 22 m, esto es porque el análisis que se realiza es anual y sería equivalente a los recursos indicados.

Como resumen del capítulo se puede considerar la siguiente gráfica:



Nota: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- 1) Las empresas tienen como propósito maximizar el valor y minimizar la incertidumbre, por lo tanto, es necesario considerar en todas las etapas previas a construcción el análisis de riesgo. Para esta investigación, se consideró en la etapa de factibilidad.
- 2) Es necesario considerar dentro del plan de minado el análisis del riesgo e incertidumbre. Ello ayudará a realizar planes de acción.
- 3) Durante el desarrollo de la tesis, se identificó que hay otros factores o variables dentro del área de geología que deberían ser evaluados como la densidad, la geometría de veta (que no son motivo de esta tesis), siendo esto factores que impacta a los tonelajes de mineral.
- 4) La metodología propuesta en esta tesis propone un proceso de análisis de incertidumbre y riesgo con enfoque en el análisis y comprensión de la fuente del riesgo en el proceso de evaluación del plan de minado, logrando la clasificación, caracterización y cuantificación de ciertos parámetros relevantes, proporcionando una ayuda en la toma de acción para cumplir el plan de minado, sería la toma de decisiones reduciendo la malla de perforación o y reduciendo así la malla de perforación.
- 5) Considerando el análisis de riesgo e incertidumbre para el Au en plan de minado dentro de los cinco primeros años se determinó que hay una pérdida (riesgo) del 17% de onzas con respecto al programado.
- 6) La pérdida potencial es de 17% que implicaría de US\$ 19.6 MM (US\$ 115.3 MM a US\$ 95.7 MM, en los cinco primeros años). Por lo tanto, al ejecutar la malla de perforación estaría costando US\$ 2.4 MM. En conclusión, el plan de acción es viable.
- 7) Analizando los cinco primeros años del plan de minado, se concluye que el año 03 tiene PVaR muy alto (28.2%), los años 02 y 04 tienen PVaR alto (15% y 22.1%, respectivamente).

- 8) Utilizando el PVaR del año 03 (28.2%) en el flujo de caja en el payback, se tendrá una pérdida de US\$ 7.52 MM a US\$ -24.88 MM.
- 9) El año 03, es el año que se está programado más onzas, por lo tanto, es de gran expectativa, considerando el análisis del riesgo se puede determinar que es el año de mayor PVaR (28.2%). Para mitigar este riesgo se sugiere realizar perforación diamantina dentro de 15 a 22 m. El autor considera este rango para la categoría recursos indicados.
- 10) Los años 01 y 05, tiene PVaR medio, 9.1% y 5.3%, respectivamente. En esta ocasión el autor considera que con laboreo y muestreo minero sería necesario para mitigar el medio riesgo que se tiene.
- 11) Al utilizar la simulación condicional de la Ley de Oro, en la metodología de espaciamiento óptimo de la malla de perforación, los criterios para categorizar los Recursos Indicados se pueden evaluar de manera práctica. Estos resultados también se pueden validar utilizando el método del "Límite de Confianza".
- 12) El enfoque principal de estudios futuros se daría en el desarrollo de una metodología que ayude a integrar variables adicionales para cuantificar el riesgo como lo fue este caso de estudio, tales como la ley de otros elementos, tonelaje, recuperaciones metalúrgicas, variables geotécnicas, geometría, precio y varios. Esto se debe a que se descubrieron numerosos parámetros de riesgo en el proceso de evaluación de un plan de minado.

RECOMENDACIONES

- Para evitar el impacto negativo a la valorización financiera debido al incumplimiento de la producción (cantidad de onzas), es importante considerar la metodología de análisis en riesgo e incertidumbre al momento de elaborar el plan de minado. Por lo tanto, las empresas mineras deben considerar la metodología presentada.
- El estudio ha demostrado que la metodología de VaR (5%), el valor del riesgo con 5% de confianza, y DVaR (5%), desviación del VaR en función al objetivo, y PVaR (5%), proporción del DVaR en función del objetivo, permite calcular el riesgo por año. Por lo tanto, para prevenir el incumplimiento del plan de minado, se recomienda calcular el riesgo en función a un objetivo.
- En el año 03 se tiene un riesgo de 28.2%, calculando el VPN del payback (periodo de recuperación de la inversión) de la empresa se tendría una pérdida de US\$ 7.52 MM a US\$ -24.88 MM. Por lo tanto, se recomienda realizar una campaña de perforación diamantina dentro de una malla de 15 a 22m, para categorizar recursos indicados.

BIBLIOGRAFÍA

(s.f.).

- Alfaro Sironvalle, M. A. (2014). *Estimación de Recursos Mineros y Simulación Condicional en un Depósito Minero*. Lima - Perú.
- Ausenco. (2022). *Final Report, Feasibility Study - San Gabriel*. Moquegua - Peru.
- Beltran, A., & Cueva, H. (2023). *Evaluación Privada de Proyectos*. Lima - Perú: Universidad del Pacífico.
- Botin, J. A. (2019). *Gestión de riesgo en decisiones de inversión minera: Un enfoque global*. Madrid - España.
- Botín, J. A., Campbell, A. N., & Guzmán, R. (2014). *A Simulation model for the optimization and risk management of preproduction mine development in a block caving mining project*. Salt Lake - Utah.
- Bravo Mendoza, O., & Sánchez Celis, M. (2012). *Gestión Integral de Riesgos*. Bogotá - Colombia: Bravo & Sánchez.
- Cerda Zamudio, C. P. (2016). *Análisis de riesgo asociado a incertidumbre operacional en planes mineros para minería a cielo abierto. (Tesis Grado de Ingeniero Civil de Minas)*. Universidad de Chile, Chile.
- Contreras, E., & Cruz, J. M. (2009). *No más VAN: el Value at Risk (VaR) del VAN, una nueva metodología para análisis de riesgo*. Atacama - Chile.
- Damghani, K., Taghavifard, M., & Moghaddam, R. (2019). *Decision Making Under Uncertain and Risky Situations*.
- De la Vega Meneses, J. G. (2012). *Aplicación del Concepto de Valor Presente Neto como Técnica para Evaluar el Desempeño Económico de los Países*. México.
- Deutsch, C. (2017). *Guide to Best Practice in Geostatistics*. Lima - Peru.
- Emery, X. (2010). *Curso Geoestadística Aplicada a la Evaluación de Yacimientos*. Santiago - Chile: Universidad de Chile.
- Esan. (15 de Julio de 2016). *La Gestión Integral de Riesgo*. Obtenido de <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/la-gestion-integral-de-riesgos>
- Flores Vera, C. A. (2022). *Análisis de Prefactibilidad de Inversión en el Ambito Mienro de Sudamerica. (Tesis Grado de Magister en Minería)*. Universidad de Chile, Santiago de Chile - Chile.
- Furtado e Faria, M., Dimitrakopoulos, R., & Lopes Pinto, C. L. (2022). *Integrated Stochastic Optimization of stope Design and Long-term Underground Mine Production Scheduling*. Quebec - Canada.
- Gala, F. (2020). *Curso de Evaluación y Valoración de Proyectos Mineros*. Escuela de Postgrado Gerens.
- García Dávila, J. J. (2011). *Planeamiento minero de Corporación Minera Castrovirreyna. (Tesis grado de Ingeniero de Minas)*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima - Perú.
- Gutiérrez Ramírez, J. E. (2022). *Análisis de Riesgo Considerando la Incertidumbre de Variables Geológicas en Minería Subterránea. (Tesis Grado de Magister en Minería)*. Universidad de Chile, Santiago - Chile.
- Gutiérrez Ramírez, J. E., & Hidalgo, E. (2020). *Análisis de la Incertidumbre Geológica para definir Objetivos de Perforación "Infill"*. Lima - Perú.
- Gutiérrez Ramírez, J. E., Munizaga Rosas, J. C., & Hidalgo Muñoz, E. (2023). *Metodología para Cuantificar el Riesgo en Recursos Minerales*. Trujillo - Lima.
- Gutiérrez Ramírez, J. E., Perez, A., Barreda, J., & Hidalgo, E. (2023). *Metología para Evaluar Planes de Perforación con Analisis Técnico- Economico e Incertidumbre Geológica*. Lima - Perú.

- Hernández Guerra, H. (30 de Abril de 2022). *Nube Minera*. Obtenido de <https://nubeminera.cl/modelamiento-implicito/>
- Marín Suárez, A. (2011). *Curso de Geoestadística I y II*. Lima - Peru: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Matheron, G. (1970). *La Teoría de las Varibales Regionalizadas y sus Aplicaciones*. Paris - Francia: Los cuadernos del Centro de Morfología Matemática de Fontainebleau.
- Mendiola, A., Aguirre, C., Del Castillo, C., Ccopa, M., Flores, L., & Ortiz, R. (2014). *Valoración de una Empresa con Opciones Reales: El caso de Mnera Aurifera Peruana*. Lima - Peru: Universiad ESAN.
- Mun, J. (2015). *Modeling Risk*. California - USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Munizaga Rosas, J. C. (2018). *Modelling Risk and Decision Making (Diapositivas de PowerPoint)*. Santiago - Chile: Universidad de Chile.
- Naranjo Núñez, R. (2005). Modelo de Riesgo para la Evaluación Económico Financiera de Proyectos Mineros. (*Tesis grado de Ingeniero de Minas*). Universidad Politecnica de Madrid, Madrid - España.
- Olarte, J. C. (21 de 12 de 2006). Incertidumbre y Evaluación de Riesgos Financieros. *Scientia Et Technica*, págs. 347-350.
- Osher, S., & Fedkiw, R. (2003). *Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces*. Los Angeles - EEUU: University of California.
- Pérez Strutz, C. M. (2011). Modelamiento Geológico Estocástico con Simulación Geoestadística. (*Tesis de título de Ingeniero Civil de Minas*). Universidad de Chile, Santiago - Chile.
- Resources, C. M., & Committee, M. R. (2019). *CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines*. Quebec - Canada: Canadian Institute Of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- Retto Magallanes, O., & Saez Rivera, F. (2013). Estudio de Espaciamiento Optimo de Taladros Usando Simulación Condicional en la Mina Tantahuatay. *ProExplo 2013*, (pág. 15). Lima - Peru.
- Rivera, S. (2015). Modelamiento Geológico: Antiguas Prácticas v/s nuevas tecnologías. *Taller " Estimacion de Recursos Minerales"*. Comisión Calificadora de Competencias en Recursos y Reservas Minerales.
- Rondon, O. (2023). Drillhole Spacing Anaysis Using Simulated Information. Lima - Peru: Snowden.
- Santana Perez, M. (2020). Maximización de Valor Presente Neto a través de la Optimización de la ley de Corte en una Mina Subterránea. (*Tesis Grado de Ingeniero de Minas*). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima - Perú.
- SRK Consulting. (2021). *Autoría de Alto Nivel de Estimacion de Recursos Proyecto San Gabriel*. Moquegua - Perú.
- SRKConsulting. (2023). *Procedimiento de Ensayo de Densidad en Minas Coimolache*. Cajamarca - Perú.
- Urieta Gómez, E. A. (2021). Valoración Finannciera bajo Incertidumbre de un Proyecto Mienro de Agreegdos Pétros. (*Tesis grado de Magister en Ingenieria Administrativa*). Universidad Nacional de Colombia, Medellín - Colombia.
- Valenzuela Saintard, F. I. (2013). Modelos de Gestión del Riesgo Asociado a la Incertidumbre en las Variables Insentrías del Proceso de Evaluacion de Recursos. (*Tesis grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería*). Pontificia Universidad Catolica de Chile, Santiago de Chile - Chile.
- Vargas Machuca Bueno, O. (2017). Implementación del Modelamiento en 3D y Estimación de los Recursos con Métodos Geoestadísticos Mina Chipmo U.E.A Orcopampa -

- CMBSAA. (*Tesis Grado de Ingeniero Geólogo*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú.
- Verly, G., Postolski, T. A., & Parker, H. (2014). *Assessing Uncertainty with Drill Hole Spacing Studies – Applications to Mineral Resources*. Perth - Australia: Orebody Modelling and Strategic Mine Planning Symposium.
- Vila Valenzuela, J. A., & Zafra Siancas, J. A. (2019). Optimización de Beneficios con Gestión de Riesgos en las Minas Subterráneas - Grupo Volcan. (*Tesis Grado para Magíster en Regulación, Gestión y Economía Minera*). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima - Perú.



ANEXOS

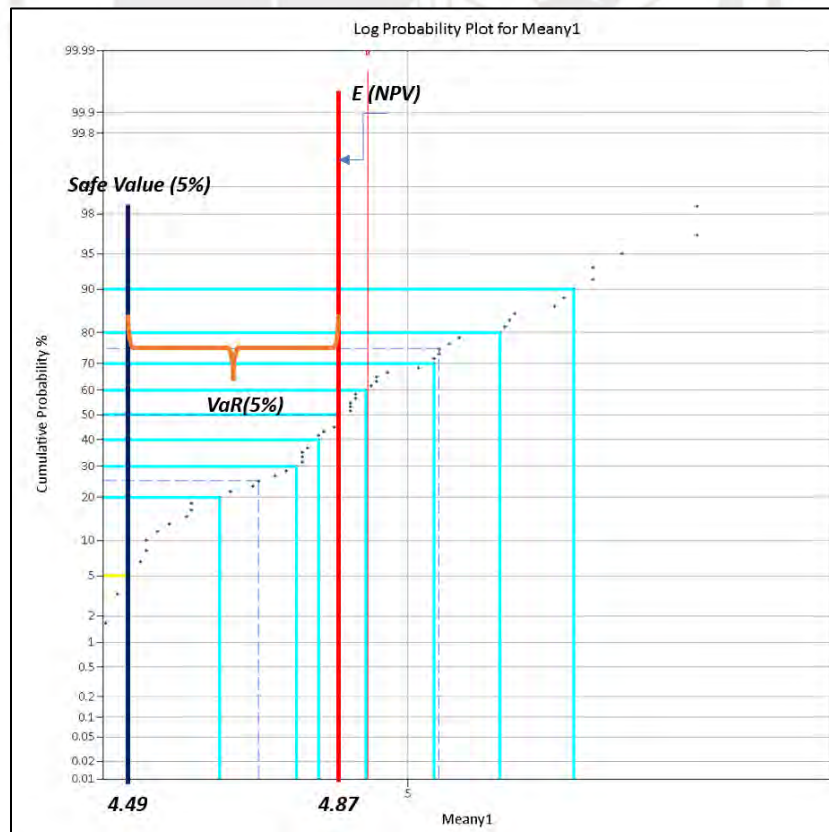
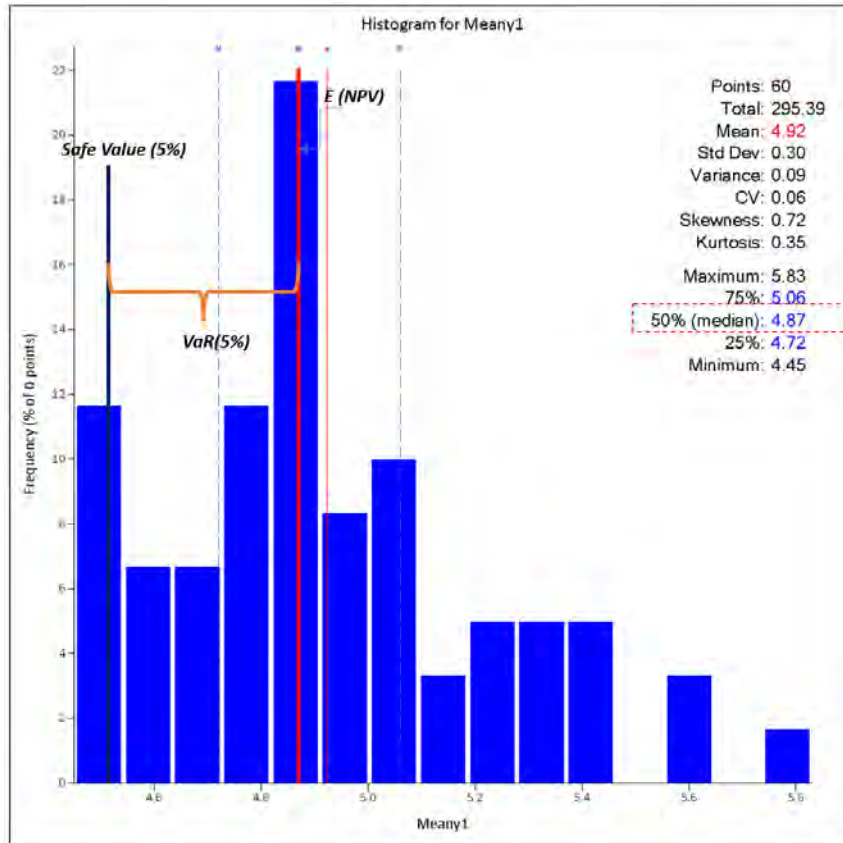


Plan de Minado y excavación 1

Metodo Minado	Data	Pre-OP	Año 01	Año 02	Año 03	Año 04	Año 05	Año 06	Año 07	Año 08	Año 09	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Grand Total
UDF	Ton Rec	374,092	653,608	655,370	653,587	653,545	225,575										3,215,777
UDF	Au Dil	4.34	4.91	4.4	5.8	4.76	4.71										4.88
UDF	Ag Dil	2.95	2.76	2.6	3.47	4.5	5.75										3.46
UDF	Cu Dil	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04										0.22
UDF	NSRTOTDIL	195	219	194	247	200	199										212
UDF	Rec Au Dil	87%	87%	86%	83%	82%	82%										85%
UDF	Rec Ag Dil	50%	50%	49%	48%	49%	48%										49%
SARC	Ton Rec												132,318	671,365	671,352	144,150	1,619,185
SARC	Au Dil												2.74	3.15	3.21	2.57	3.09
SARC	Ag Dil												8.9	7.29	8.92	8.5	8.21
SARC	Cu Dil												0.04	0.06	0.11	0.19	0.41
SARC	NSRTOTDIL												124	140	141	114	137
SARC	Rec Au Dil												86%	85%	84%	85%	85%
SARC	Rec Ag Dil												45%	43%	40%	41%	42%
ODF	Ton Rec	102,977	439,673	440,884	439,672	439,648	871,918	1,102,204	1,099,104	1,099,068	1,099,110	1,102,140	969,316	439,642	439,652	14,390	10,099,398
ODF	Au Dil	5.06	4.98	5.74	5.33	4.61	4.02	3.86	3.93	4.05	3.83	3.35	3.23	3.05	2.62	2.3	3.93
ODF	Ag Dil	7.74	6.5	5.7	5.85	5.13	4.29	8.47	5.83	5.39	6.67	8.61	9.17	11.91	9.15	15.15	7.09
ODF	Cu Dil	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.1	0.18	0.2	0.13	0.21	0.07
ODF	NSRTOTDIL	226	222	256	237	205	180	168	175	181	171	148	144	135	118	104	175
ODF	Rec Au Dil	86%	86%	86%	86%	86%	87%	84%	86%	86%	86%	85%	85%	84%	86%	84%	86%
ODF	Rec Ag Dil	45%	45%	46%	45%	45%	47%	44%	47%	47%	45%	42%	43%	41%	44%	39%	44%
Grand Total	Ton Rec	477,069	1,093,281	1,096,254	1,093,259	1,093,193	1,097,493	1,102,204	1,099,104	1,099,068	1,099,110	1,102,140	1,101,634	1,111,007	1,111,004	158,540	14,457,291
Grand Total	Au Dil	4.50	4.94	4.94	5.61	4.7	4.16	3.86	3.93	4.05	3.83	3.35	3.17	3.11	2.98	2.55	4.18
Grand Total	Ag Dil	3.98	4.26	3.85	4.43	4.75	4.59	8.47	5.83	5.39	6.67	8.61	9.14	9.12	9.01	9.10	1.66
Grand Total	Cu Dil	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.10	0.16	0.12	0.12	0.19	0.01
Grand Total	NSRTOTDIL	202	220	219	243	202	184	168	175	181	171	148	142	138	132	113	81
Grand Total	Rec Au Dil	87%	87%	86%	84%	84%	86%	84%	86%	86%	86%	85%	85%	85%	85%	85%	85%
Grand Total	Rec Ag Dil	49%	48%	48%	47%	47%	47%	44%	47%	47%	45%	42%	43%	42%	41%	41%	47%
	Onzas Au	68,951	173,640	174,112	197,186	165,191	146,786	136,785	138,874	143,110	135,341	118,706	112,317	111,104	106,320	12,975	1,941,399

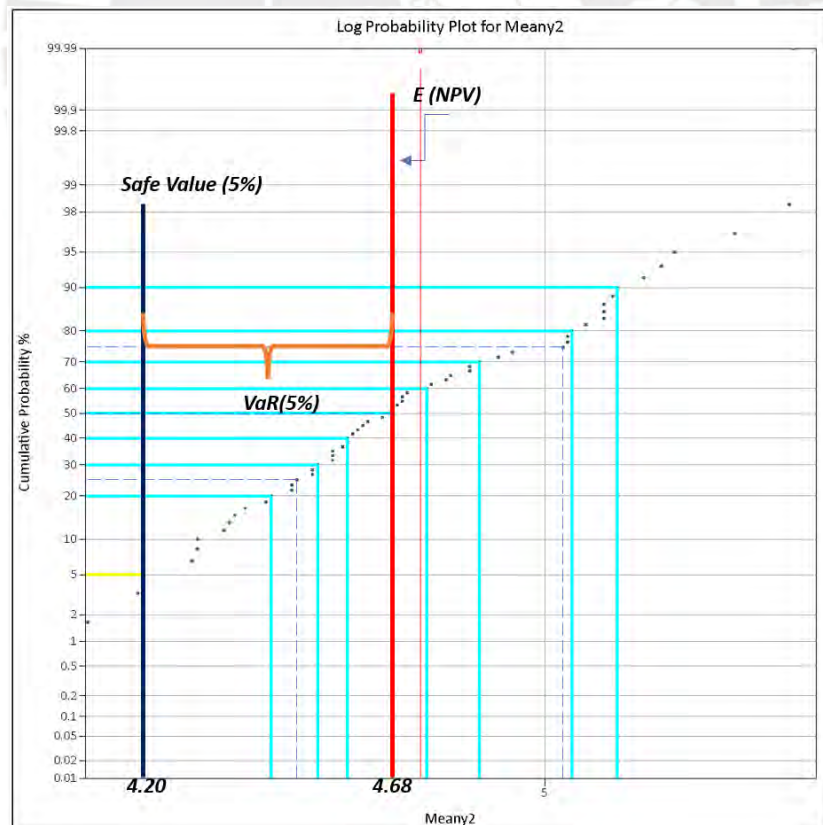
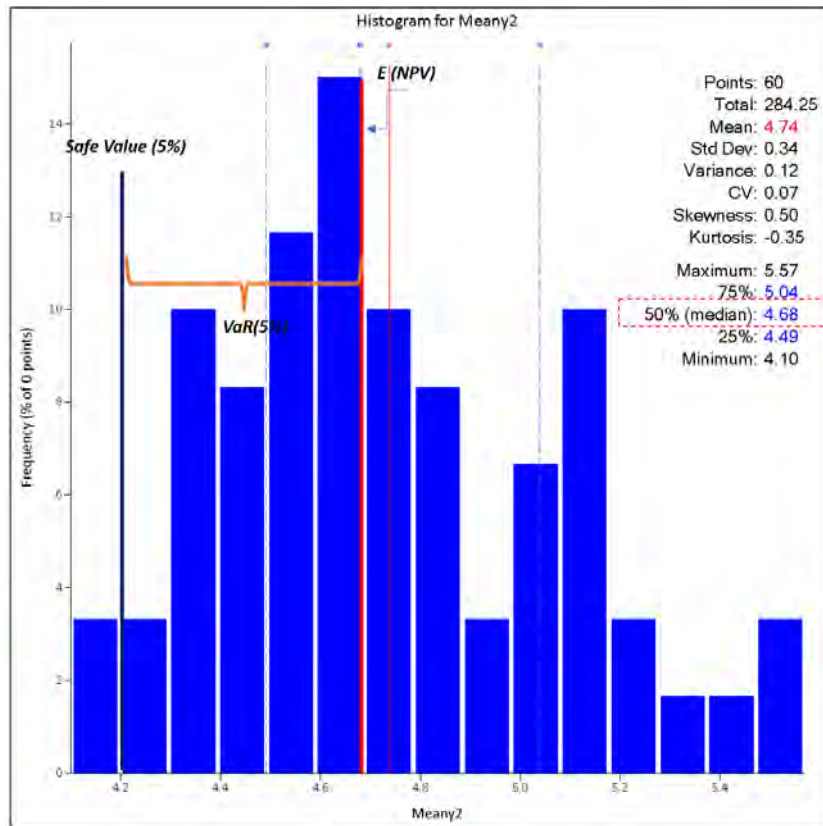
Nota: Elaboración propia.

Análisis año 01:



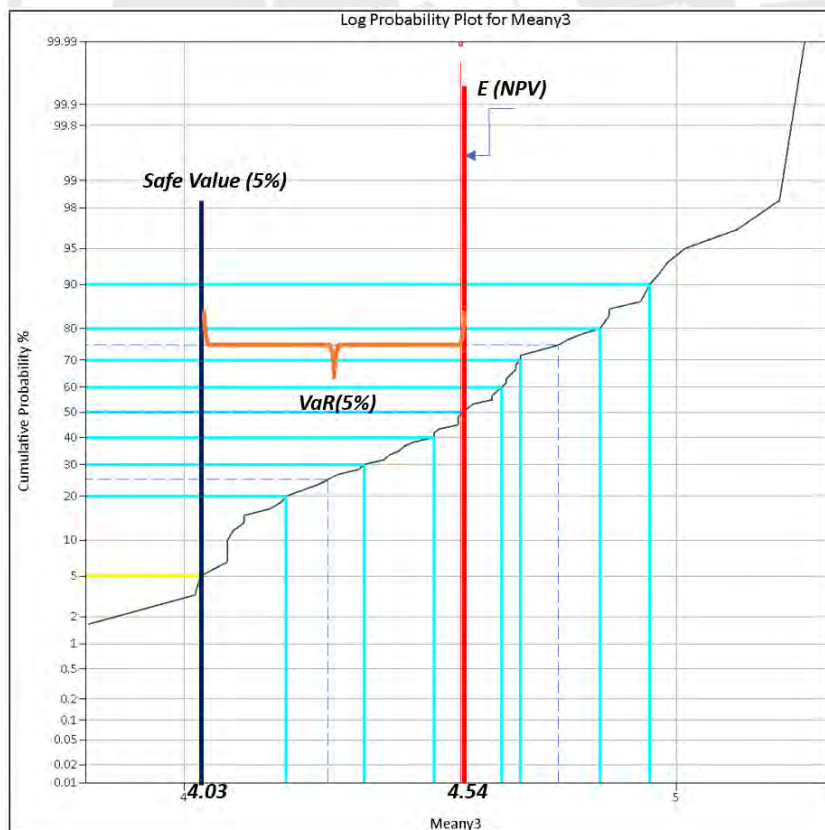
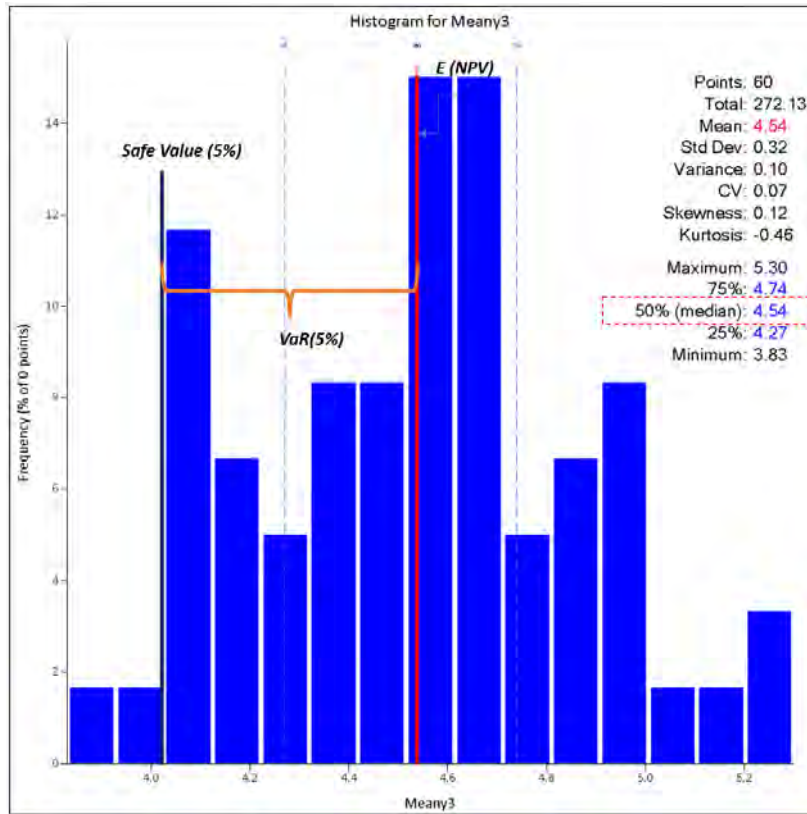
Nota: Elaboración propia.

Análisis año 02:



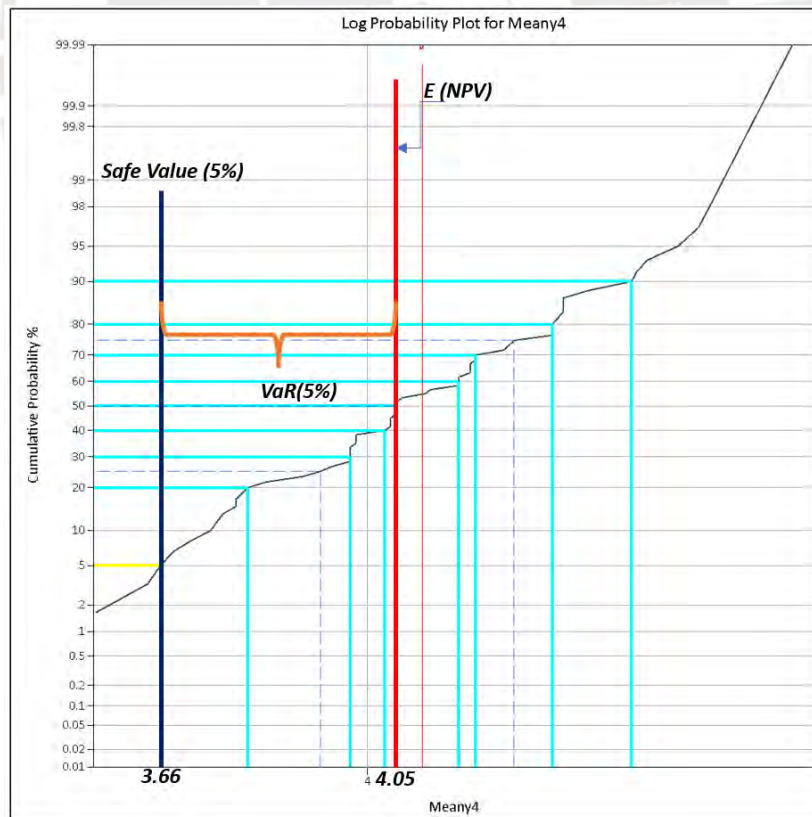
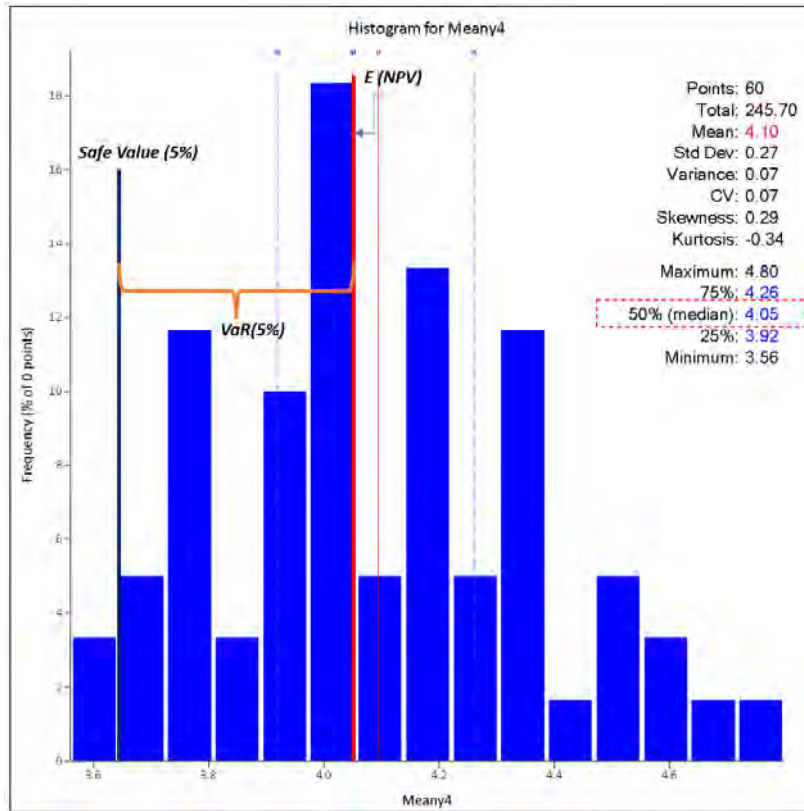
Nota: Elaboración propia.

Análisis año 03:



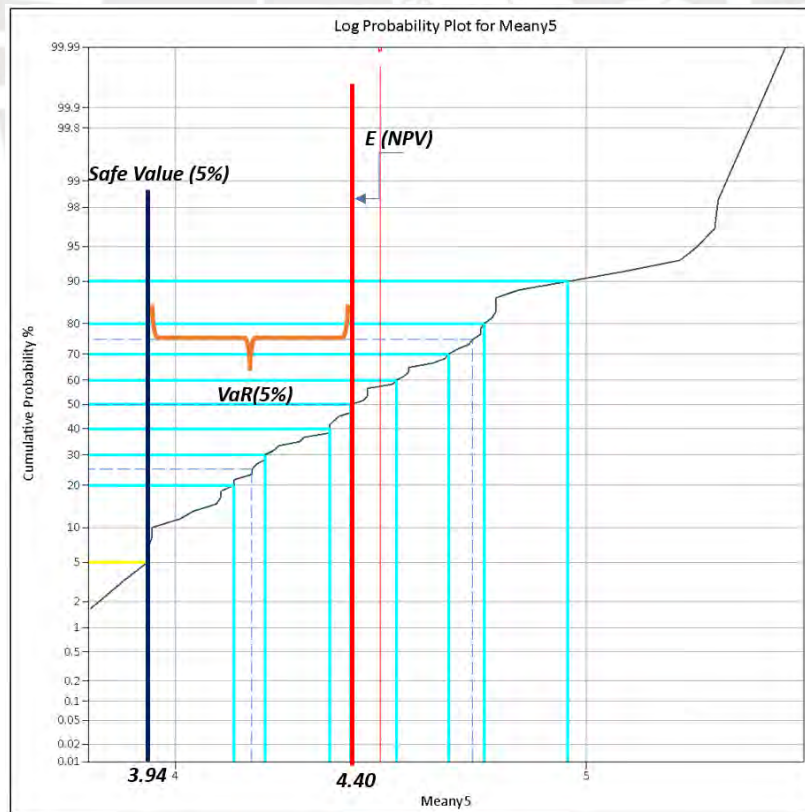
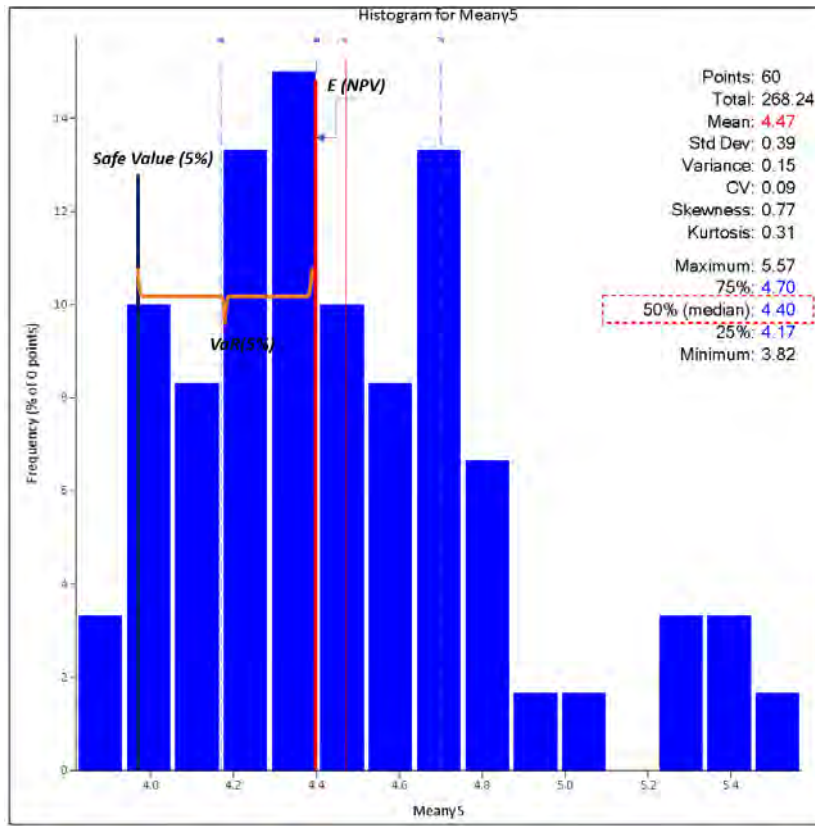
Nota: Elaboración propia.

Análisis año 04:



Nota: Elaboración propia.

Análisis año 05:



Nota: Elaboración propia.

Cálculo de riesgo

Valores Obtenidos de la Simulación

Conversion a Onzas para Cálculo del Riesgo

	Safe value (5%)	E(npv) median	Objetivo KO (Au)	Tonelaje	Safe value (5%) Oz	E(npv) median Oz	Objetivo KO (Au Oz)	VaR (5%)	DVaR (5%)	PVaR (5%)
Año 01	4.49	4.87	4.94	1,093,281	157,822	171,179	173,640	13,357	15,817	9.1%
Año 02	4.2	4.68	4.94	1,096,254	147,629	164,501	174,112	16,872	26,483	15.2%
Año 03	4.03	4.54	5.61	1,093,259	141,654	159,580	197,186	17,926	55,533	28.2%
Año 04	3.66	4.05	4.7	1,093,193	128,648	142,357	165,191	13,708	36,542	22.1%
Año 05	3.94	4.5	4.16	1,097,493	138,490	158,174	146,786	19,684	8,296	5.7%

Nota: Elaboración propia.

Valorización Conceptual: Se tiene un valor proyectado de US\$ 212,262,153 durante los 14 años.

Valorización conceptual 1

Ingresos	Consideraciones	Pre - Op	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14
Toneladas Mes (10.24 Meses)	3600	477,069	1,093,281	1,096,254	1,093,259	1,093,193	1,097,493	1,102,204	1,099,104	1,099,068	1,099,110	1,102,140	1,101,634	1,111,007	1,111,004	158,540
Precio Oro (BVN-2023)	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
Ley Promedio (g/t)	3.98	4.50	4.94	4.94	5.61	4.70	4.16	3.86	3.93	4.05	3.83	3.35	3.17	3.11	2.98	2.55
Recuperación	0.85	0.87	0.86	0.86	0.84	0.84	0.86	0.84	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Ventas		95,990,838	241,643,449	239,552,404	265,094,551	222,025,839	202,089,209	183,860,386	191,112,628	196,941,677	186,250,728	161,458,194	152,767,882	151,117,771	144,611,649	17,647,749
Egresos																
Costo Mina (\$/t)	50	23,853,450	54,664,050	54,812,700	54,662,950	54,659,650	54,874,650	55,110,200	54,955,200	54,953,400	54,955,500	55,107,000	55,081,700	55,550,300	55,550,200	7,927,000
Costo Planta (\$/t)	25	11,926,725	27,332,025	27,406,350	27,331,475	27,329,825	27,437,325	27,555,100	27,477,600	27,476,700	27,477,750	27,553,500	27,540,850	27,775,175	27,775,100	3,963,500
Costo Servicios (\$/t)	25	11,926,725	27,332,025	27,406,350	27,331,475	27,329,825	27,437,325	27,555,100	27,477,600	27,476,700	27,477,750	27,553,500	27,540,850	27,775,175	27,775,100	3,963,500
Capex (Contingencia 50%)		500,000,000														
Capex Aurora (Avance*1.4)			10,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000	16,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000	16,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000
Ingresos-Egresos Anuales (US\$)		451,716,062	122,315,349	119,927,004	145,768,651	102,706,539	76,339,909	63,639,986	71,202,228	77,034,877	66,339,728	41,244,194	26,604,482	30,017,071	23,511,249	8,206,251
NPV Ingresos-Egresos Anuales (US\$)			212,262,153													

Nota: Elaboración propia.

Valorización Conceptual (Payback): Se tiene un valor proyectado de US\$ 7,520,854 durante los primeros 5 años.

Valorización Conceptual (Payback)

Ingresos	Consideraciones	Pre - Op	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Toneladas Mes (10.24 Meses)	3600	477,069	1,093,281	1,096,254	1,093,259	1,093,193	1,097,493
Precio Oro (BVN-2023)	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
Ley Promedio (g/t)	3.98	4.50	4.94	4.94	5.61	4.70	4.16
Recuperación	0.85	0.87	0.86	0.86	0.84	0.84	0.86
Ventas		95,990,838	241,643,449	239,552,404	265,094,551	222,025,839	202,089,209
Egresos							
Costo Mina (\$/t)	50	23,853,450	54,664,050	54,812,700	54,662,950	54,659,650	54,874,650
Costo Planta (\$/t)	25	11,926,725	27,332,025	27,406,350	27,331,475	27,329,825	27,437,325
Costo Servicios (\$/t)	25	11,926,725	27,332,025	27,406,350	27,331,475	27,329,825	27,437,325
Capex (Contingencia 50%)		500,000,000					
Capex Aurora (Avance*1.4)			10,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000	16,000,000
Ingresos-Egresos Anuales (US\$)		451,716,062	122,315,349	119,927,004	145,768,651	102,706,539	76,339,909
NPV Ingresos-Egresos Anuales (US\$)			7,520,854				

Nota: Elaboración propia.

Valorización Conceptual (Payback): Si se considera el riesgo solo en el año 03, el valor del proyecto sería de US\$ -24,879,585; lo que quiere decir que no sería rentable que el proyecto ingrese a producir:

Valorización Conceptual (Payback)

Ingresos	Consideraciones	28%						
		Pre - Op	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	
Toneladas Mes (10.24 Meses)	3600	477,069	1,093,281	1,096,254	1,093,259	1,093,193	1,097,493	
Precio Oro (BVN-2023)	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	
Ley Promedio (g/t)	3.98	4.50	4.94	4.94	5.61	4.70	4.16	
Recuperación	0.85	0.87	0.87	0.86	0.84	0.84	0.86	
Ventas		95,990,838	241,643,449	239,552,404	265,094,551	222,025,839	202,089,209	
Egresos								
Costo Mina (\$/t)	50	23,853,450	54,664,050	54,812,700	54,662,950	54,659,650	54,874,650	
Costo Planta (\$/t)	25	11,926,725	27,332,025	27,406,350	27,331,475	27,329,825	27,437,325	
Costo Servicios (\$/t)	25	11,926,725	27,332,025	27,406,350	27,331,475	27,329,825	27,437,325	
Capex (Contingencia 50%)		500,000,000						
Capex Aurora (Avance*1.4)			10,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000	16,000,000	
Ingresos-Egresos Anuales (US\$)		-	451,716,062	122,315,349	119,927,004	145,768,651	102,706,539	76,339,909
Análisis riesgo		-	451,716,062	122,315,349	119,927,004	104,953,429	102,706,539	76,339,909
NPV Ingresos-Egresos Anuales (US\$)		-	24,879,585					

Nota: Elaboración propia.

Presupuesto para mitigar el riesgo: Se está proponiendo una campaña de perforación diamantina para minimizar el riesgo en el año 03, el presupuesto a considerar es de US\$ 2 M. Considerando el flujo de caja sin el riesgo en el año 03 será US\$ 145 M y considerando el riesgo serio de US\$ 104 M, por lo tanto, sería rentable la ejecución de la campaña de perforación.:

Presupuesto para mitigar el riesgo

	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12	Total
1. Actividades de Campo													
Trabajos de Superficie	\$		50,000										50,000
Perforación diamantina	\$			328,064	336,964	336,464	300,964	51,464	116,964	11,176			1,482,060
Total en Actividades en Campo	\$	0	0	50,000	328,064	336,964	336,464	300,964	51,464	116,964	11,176	0	1,532,060
2. Mano de Obra													
Total de Mano de Obra	\$	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	80,000	40,000	40,000	40,000	104,375	80,000	624,375
Sub-Total	\$	40,000	40,000	90,000	368,064	376,964	376,464	380,964	91,464	156,964	51,176	104,375	2,156,435
Imprevistos / Contingencia (5%)	\$	2,000	2,000	4,500	18,403	18,848	18,823	19,048	4,573	7,848	2,559	5,219	107,822
TOTAL PRESUPUESTO	\$	42,000	42,000	94,500	386,467	395,812	395,287	400,012	96,037	164,812	53,735	109,594	2,264,257

Nota: Elaboración propia.