

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA
EN EL PLANEAMIENTO MINERO APLICADO AL
DISEÑO DEL TAJO MORRENAS, 2023**

TESIS

Presentada por:

Bach. Klever Lazo Hanco

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA – PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA EN EL PLANEAMIENTO MINERO APLICADO AL DISEÑO DEL TAJO MORRENAS, 2023

Tesis sustentada y aprobada el 1de octubre de 2024, estando el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Jorge José Segura Dávila

1er. MIEMBRO
(SECRETARIO)


.....
MSc. Salomón Medardo Ortiz Quintanilla

2do. MIEMBRO
(VOCAL)


.....
Ing. Fernando Velásquez Díaz

ASESOR


.....
MSc. Salomón Medardo Ortiz Quintanilla

CERTIFICADO DE SIMILITUD

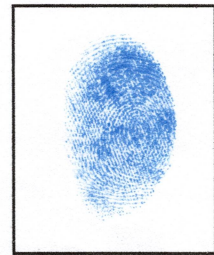
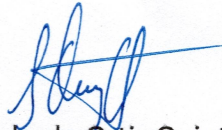
Yo, SALOMÓN MEDARDO ORTIZ QUINTANILLA, en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 8314-2023-FAIN/UNJBG de la tesis titulado: EVALUACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE GEOLÓGICA EN EL PLANEAMIENTO MINERO APLICADO AL DISEÑO DEL TAJO MORRENAS, 2023

Presentado por el Bachiller KLEVER LAZO HANCCO, Para optar título profesional de Ingeniero de Minas.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual** TURNITIN cuenta con el **nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es** 07 % Por lo que, **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciado líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 03 de octubre de 2024

FIRMA ASESOR

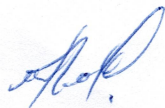


Huella digital

Nombres y apellidos, DNI Salomón Medardo Ortiz Quintanilla 00425524

ORCID: 0000-0002-5185-9929

FIRMA TESISTA



Huella digital

Nombres y apellidos, DNI Klever Lazo Hanco

Código C.U. N°: 2014-101008

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres, a dos personas influyentes para mí Sr. Edwin y Sra. Felicia por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, y brindarme todo su apoyo incondicional para la realización de este trabajo. A todas las personas que formaron parte de mi desarrollo y aportaron a mi formación tanto personal como profesional y a mi persona maravillosa Micaela.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en especial a mi querida alma mater “Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann” y docentes. A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formar parte de esta prestigiosa universidad y por comprender en muchas ocasiones mis múltiples actividades.

Muchas gracias a todos.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE ANEXO	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Antecedentes del problema	3
1.1.2. Problema de la investigación	5
1.2. Formulación del problema	6
1.2.1. Problema general	6
1.2.2. Problemas específicos	6
1.3. Justificación e importancia	7
1.4. Alcances y Limitaciones	9

1.5.	Objetivos	10
1.5.1.	Objetivo general	10
1.5.2.	Objetivos específicos	10
1.6.	Hipótesis	11
1.6.1.	Hipótesis general	11
1.6.2.	Hipótesis específicas	11
1.7.	Variables	12
1.8.	Operacionalización de variables	12

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes del estudio	15
2.2.	Bases teóricas	20
2.2.1.	Tajo Morrenas	20
2.2.2.	Optimización de tajos	37
2.2.3.	Planificación determinística	38
2.2.4.	Incertidumbre geológica	39
2.2.5.	Planificación estocástica	42
2.2.6.	Evaluación económica	44
2.3.	Definición de términos	47
2.3.1.	Alteración	47

2.3.2. Altura de banco	48
2.3.3. Ancho de berma (W)	49
2.3.4. Ancho de rampas	50
2.3.5. Ángulo global	50
2.3.6. Ángulo interrampa (IRA)	50
2.3.7. Ángulo de banco (BFA)	51
2.3.8. Modelo geológico	52
2.3.9. Ley equivalente	52
2.3.10. Indicador económico de decisión (Cut Off)	53
2.3.11. Recursos mineros	54
2.3.12. Relación estéril mineral (REM)	54
2.3.13. Reservas mineras	55
2.3.14. Simulación condicional	56
2.3.15. Tasa interna de retorno (TIR)	57
2.3.16. Valor actual neto (VAN)	58
2.3.17. Viabilidad técnica económica	59

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación	60
3.2. Población y muestras	61

3.3.	Equipos y herramientas	61
3.4.	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	62
3.5.	Técnicas para el procesamiento de datos	67

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Resultados de la investigación	69
4.2.	Análisis y pruebas del contraste de hipótesis	91
4.2.1.	Certeza de leyes	91
4.2.2.	Contacto geológico	94
4.2.3.	Evaluación económica	95
4.2.4.	Diseño de tajo Morrenas	97
4.3.	Discusión de resultados	102
4.3.1.	Resultado de certeza de leyes	102
4.3.2.	Resultado de contacto geológico	102
4.3.3.	Resultado de evaluación económica	103
4.3.4.	Resultado de diseño tajo Morreas	104
	CONCLUSIONES	106
	RECOMENDACIONES	108
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	ANEXOS	116

ÍNDICE DE ANEXO

	Pág.
Anexo 1. Matriz de consistencia	117
Anexo 2. Ubicación de la mina Pucamarca	118
Anexo 3. Configuración de diseño	119
Anexo 4. Diagrama del modelo de optimización tajo final	120
Anexo 5. Modelos geológicos de alteraciones	121
Anexo 6. Ubicación de puntos de sondeos	122
Anexo 7. Diseño optimizado de tajo Morrenas	123
Anexo 8. Modelamiento de distancia de influencia	124
Anexo 9. Modelamiento de Incertidumbre	125
Anexo 10. Modelamiento de Incertidumbre en porcentaje	126
Anexo 11. Modelamiento de la incertidumbre según tendencia	127
Anexo 12. Modelamiento de la incertidumbre % según tendencia	128
Anexo 13. Código Python Adaptado	129

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Programas de producción sometidos a alta variabilidad	8
Figura 2 VAN de modelos estocásticos y determinístico	17
Figura 3 Comparación de mineralización	18
Figura 4 Mapa geológico regional	24
Figura 5 Esquema de la estructura triangular Tolaviata	28
Figura 6 Esquema de la estructura pull apart Pucamarca	29
Figura 7 Sección longitudinal Zoneamiento de alteración hidrotermal	30
Figura 8 Zoneamiento de yacimientos epitermal de Au y Ag	30
Figura 9 Soporte de estimación de recursos mineros	34
Figura 10 Modelo de alteraciones de cuerpos epitermal	35
Figura 11 Planificación determinista	38
Figura 12 Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros	40
Figura 13 Proceso de Gestión de Riesgos	41
Figura 14 Proceso de la planificación estocástica	42
Figura 15 Planificación estocástica versus determinista	43
Figura 16 Ingreso de parámetros por escenarios de estudio	46
Figura 17 Resultado económico por escenario programa Simched PO	47
Figura 18 Parámetros diseño de tajo	51

Figura 19 Clasificación de recursos y reservas	55
Figura 20 Escenarios de simulación condicional gaussiana	56
Figura 21 Histograma de las leyes de Au y Ag crudas	69
Figura 22 Histograma leyes de Au y Ag con transformación Gaussiana	70
Figura 23 Correlación de variable Ley Au y Ley Ag	71
Figura 24 Análisis estructural de la variable Ley Au y Ley Ag	71
Figura 25 Modelamiento estructural de la variable Ley Au y Ley Ag	72
Figura 26 Estimación de las variables Ley Au y Ley Ag	73
Figura 27 Casos comportamiento contacto alteración Morrenas	76
Figura 28 Resultado variable tonelaje de mineral	79
Figura 29 Resultado variable ley de oro	80
Figura 30 Resultado variable onzas de oro	81
Figura 31 Resultado variable VAN	82
Figura 32 Resultado variable tonelaje de desmonte	83
Figura 33 Resultado variable REM	84
Figura 34 Caja bigotes variable contacto, ley Au y REM	88
Figura 35 Caja bigotes variable tonelaje de mineral y desmonte	88
Figura 36 Caja bigotes variable onza de Au y VAN	89
Figura 37 Análisis del cumplimiento de minado del tajo Morrenas	93
Figura 38 Probabilidad esperada cumplimiento minado tajo Morrenas	93

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Operacionalización de variables independientes	13
Tabla 2 Operacionalización de variables dependientes	13
Tabla 3 Operacionalización de variables asociadas	14
Tabla 4 Parámetros geotécnicos de diseño tajo Morrenas	33
Tabla 5 Recursos minerales en tajos sin Cut off	36
Tabla 6 Recursos minerales en tajos con Cut off	36
Tabla 7 Instrumento de recolección de muestras	66
Tabla 8 Data de 30 casos de comportamiento geológico	74
Tabla 9 Parámetros económicos para calcular Ley Au Eq	75
Tabla 10 Recuperación del Au en base a intervalo de leyes	75
Tabla 11 Parámetros económicos para la evaluación de escenarios	77
Tabla 12 Resultados de la evaluación económica por escenarios	77
Tabla 13 Resultados de información de análisis por escenarios	85
Tabla 14 Prueba de normalidad de variables	86
Tabla 15 Prueba de normalidad de variables modificadas	87
Tabla 16 Análisis estadístico descriptivo de las variables de estudio	90
Tabla 17 Resumen de resultados	90
Tabla 18 Prueba hipótesis para el indicador Au (g/t)	92

Tabla 19 Prueba hipótesis para el indicador contacto geológico	95
Tabla 20 Prueba hipótesis para el indicador VAN (MUSD)	96
Tabla 21 Prueba hipótesis para el indicador tonelaje de mineral (Mt)	98
Tabla 22 Prueba hipótesis para el indicador Onzas Au (koz)	99
Tabla 23 Prueba hipótesis para el indicador tonelaje de desmonte (Mt)	100
Tabla 24 Prueba hipótesis para el indicador REM	101

RESUMEN

El tajo Checocollo y Caldero de la U.M. Pucamarca presentan una composición de material de 3 % de finos, generando una recuperación del 69 %. Mientras que el material del tajo Morrenas presenta 49 % de finos, con una recuperación del 32 %; según los estudios de factibilidad de explotación del tajo Morrenas, el mineral del tajo Ch-Mo debe ser enviado con una relación de mezcla de 3 a 1, con la finalidad de optimizar los procesos de recuperación conjunta, de esta forma se logra mitigar los problemas de colmatación en el *pad* debido al alto contenido de finos presente en la operación. Desde este punto de vista, se establecen 30 escenarios para determinar el VAN esperado del proyecto, y su influencia en el plan de minado, obteniendo una variabilidad de 3,14 MUSD del VAN esperado respecto al VAN determinística, presentando una influencia significativa en el planeamiento de minado, en los indicadores de onza de oro (-1,2 %), tonelaje de mineral (+0,4 %), tonelaje de desmonte (-4,2 %) y REM (-3,8 %), sin embargo, el impacto de la incertidumbre sigue manteniendo la factibilidad económica del proyecto tajo Morrenas.

Palabras clave: Incertidumbre Geologica, Plane Minero, Diseño de Tajo.

ABSTRACT

The Checocollo and Caldero pit of the U.M. Pucamarca present a material composition of 3 % fines, generating a recovery of 69 %. While the material from the Morrenas pit presents 49 % fines, with a recovery of 32 %; According to the exploitation feasibility studies of the Morrenas pit, the mineral from the Ch-Mo pit must be sent with a mixing ratio of 3 to 1, in order to optimize the joint recovery processes, in this way the problems are mitigated. of clogging in the pad due to the high content of fines present in the operation. From this point of view, 30 scenarios are established to determine the expected NPV of the project, and its influence on the mining plan, obtaining a variability of 3.14 MUSD of the expected NPV with respect to the deterministic NPV, presenting a significant influence on mining planning, on the indicators of gold ounce (-1,2 %), ore tonnage (+0,4 %), strip tonnage (-4,2 %) and REM (- 3,8 %), however, the impact of uncertainty continues to maintain the economic feasibility of the Morrenas pit project.

Keywords: Geological Uncertainty, Mining Plan, Pit Design.

INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se plantea realizar un análisis económico por escenarios de la influencia de la incertidumbre geológica en el diseño del tajo Morrenas, donde la decisión se basa en la obtención de los indicadores contacto geológico, ley de Au, onzas de Au, tonelaje de mineral, tonelaje de desmonte, REM y VAN. Así mismo se resume las características de la U.M. Pucamarca, la influencia de la explotación del tajo Morrenas, haciendo que la organización se encuentre en una posición muy sólida, reduciendo de esta forma el riesgo de su rentabilidad ante presencia de la incertidumbre geológica que pueda presentar el yacimiento. Bajo este principio se ha desarrollado el presente estudio titulado “Evaluación de la Incertidumbre Geológica en el Planeamiento Minero Aplicado al Diseño del Tajo Morrenas, 2023” que está compuesto por cuatro capítulos.

En el Capítulo I, se aborda los antecedentes del proyecto Tajo Morrenas de la Unidad Minera Pucamarca, formulación del problema enfocado a la evaluación de la incertidumbre geológica y su impacto en el diseño del Tajo Morrenas y factibilidad económica, justificación e importancia del estudio, limitaciones y alcances de la investigación, objetivos e hipótesis de investigación correspondientes.

En el Capítulo II, se realiza el estudio del Marco Teórico; para establecer los lineamientos y conceptos trascendentes del estudio, antecedentes del estudio, bases teóricas para analizar los resultados en la evaluación económica del Tajo Morrenas mediante los escenarios de evaluación, desde un enfoque de diseño técnico y económico, respecto a las variables leyes, densidad y VAN; y la correspondiente definición de términos empleados en el desarrollo de la investigación.

El Capítulo III, se desarrolla el Marco Metodológico; e indica el tipo y diseño de la investigación, así como la población y las muestras tomadas en el proyecto Tajo Morrenas de la U.M. Pucamarca, operacionalización de variables del estudio en referencia a los objetivos planteados, técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos, procesamiento y análisis de datos, para obtener los resultados de la investigación.

En el Capítulo IV, incluye los resultados el contraste de hipótesis y la discusión de los resultados.

Finalmente, esta investigación se complementa con las conclusiones, sugerencias y referencias bibliográficas correspondientes.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

En los últimos años, un numeral de autores se han enfocado en el estudio de las desviaciones correspondientes al incumplimiento del planeamiento de minado, planteando nuevas metodologías de diseño y evaluación de proyectos, donde se pretende incorporar la incertidumbre de la información a los procesos de mejora. McCarthy (2003) Realiza un estudio, donde identifica las principales causas del incumplimiento del planeamiento minero, basados en 105 proyectos de minería, concluyendo que el factor geotécnico influye en un 9 %, las pruebas metalúrgicas en un 15 %, la estimación de recursos en un 17 %, y finalmente el diseño y planificación de la mina en un 32 %. Sin embargo, McCarthy indica que la estimación de recursos tiene un impacto real cercano porque el diseño y la planificación dependen principalmente de una estimación de recursos confiable, y su error está relacionado con el error en el modelo geológico, representando el 66 %. Otros autores como Burmeister (1988), Knoll

(1989) y Clow (1991), estudian causas de las desviaciones en la producción de distintas operaciones, y siempre concluyen que la que más impacto genera en los resultados es la estimación de recursos. Dominy, Noppé y Annels (2004) Realizaron un estudio de las causas en los errores en la estimación de recursos, y su impacto en el negocio minero, lograron estimar que un 10 % de variación en la ley del modelo geológico puede traducirse hasta de un 20 % a 40 % de disminución en la rentabilidad del proyecto, generando un impacto significativo en la factibilidad de las operaciones, desde este punto de vista, es necesario implementar una metodología que facilite la evaluación de la incertidumbre, expresados en certezas de cumplimiento.

La implementación de análisis de la incertidumbre geológica en el planeamiento minero es de gran importancia, porque nos permitirá cuantificar la variabilidad de los resultados respecto a cambios que se puedan presentar en el desarrollo de las operaciones, por lo tanto, se convierte en una herramienta en la toma de decisiones al momento de establecer las metas de la organización. Desde esta perspectiva el área de planeamiento de la unidad minera Pucamarca plantea la metodología para la incorporación de la incertidumbre geológica en el planeamiento minero

en los informes que viene desarrollando, reduciendo de esta forma la brecha de la variabilidad de las leyes de oro en el planeamiento a largo plazo.

1.1.2. Problema de la investigación

Un problema interesante es evaluar la influencia de la incertidumbre minera en la rentabilidad del negocio minero. Es simple pensar que, al variar los valores económicos, geológicos y operacionales, se obtendrá cambios en la envolvente económica y posteriormente en el planeamiento de minado, y por consiguiente generar un impacto en la valorización del negocio. Sin embargo, estas suposiciones, no permiten determinar qué tan aceptable es nuestro diseño frente a posibles cambios, si se presenta flexibilidad frente a riesgos considerables. Por tanto, el presente estudio pretende analizar la influencia de la incertidumbre de la información geológica en el diseño del tajo Morrenas y posteriormente evaluar su impacto en la factibilidad del proyecto, desde un enfoque basado en análisis de riesgos, con la finalidad de generar modelos que permitan analizar la aceptabilidad de diseño y viabilidad económica del proyecto.

La explotación del tajo Morrenas se hace viable operativamente junto a la explotación del tajo Checocollo, con una relación de 1 a 3, para

este escenario el tajo Checocollo aporta tonelaje, por tanto, el tajo Morrenas aporta la ley del oro, para obtener una viabilidad en el procesamiento en planta, desde este punto de vista, es necesario respaldar el cumplimiento de las leyes de oro del tajo Morrenas, determinando su variabilidad a posible cambios geológicos, y su impacto en el planeamiento minero a largo plazo.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo influye la incertidumbre geológica en el planeamiento minero aplicado al diseño del tajo Morrenas?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿En qué medida influye la certeza de leyes respecto al diseño del tajo Morrenas?
- b) ¿Cómo influye el contacto geológico en el diseño del tajo Morrenas?
- c) ¿Cómo influye la incertidumbre geológica en la evaluación económica del tajo Morrenas?

1.3. Justificación e importancia

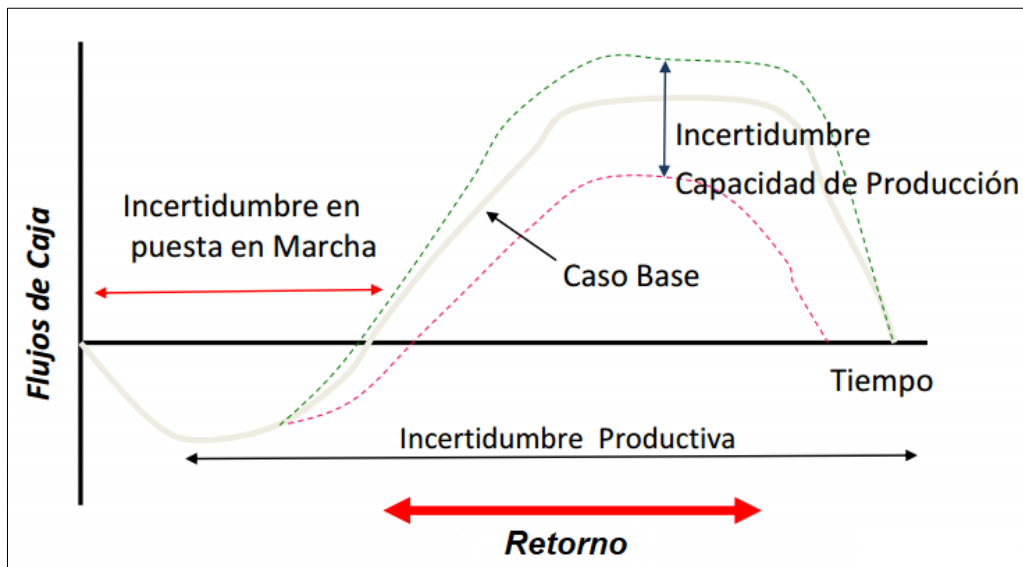
En la minería siempre se ha encontrado una brecha de incertidumbre considerable para el cumplimiento de la planificación minera, mediante los controles operativos e innovaciones tecnológicas de la industria minera, por lo que se logra obtener una planificación más robusta con adaptabilidad a cambios no esperados. De esta manera, es fácil ver que la incertidumbre asociada, no está siendo abordada debidamente en la toma de decisiones, haciéndose minería tomando un único escenario supuesto para el análisis, diseño y evaluación del proyecto.

El riesgo de los proyectos mineros, el impacto del tiempo y el manejo de la flexibilidad de la evaluación realizada son los mayores desafíos para la evaluación. Desde este punto de vista, se justifica el desarrollo de la presente investigación, que busca aplicar la metodología de riesgos de la planificación minera bajo la incertidumbre, para luego realizar la evaluación económica del proyecto incorporando la incertidumbre desde un enfoque geológico, mediante la generación de escenarios probables.

El enfoque geológico se establece en el comportamiento de la mineralización y geología del depósito, los cuales son obtenidas a través

de técnicas geoestadísticas y simulación basadas en la información proveniente de los sondajes diamantinos y taladros de perforación para voladura, realizados para la estimación y extracción de los recursos del proyecto minero, en la evaluación de escenarios probables, la incertidumbre se ira materializando en riesgos y se obtendrán datos más próximos a la realidad, disminuyendo el riesgo asociado, porque se tomarán medidas de mitigación o cambios en los diseños del tajo y planeamiento minero de manera oportuna, aumentando de esta forma el valor esperado de la extracción (figura 1).

Figura 1
Programas de producción sometidos a alta variabilidad



Fuente: Rubio, 2015.

El presente estudio es de gran relevancia en el proceso de análisis de escenarios de evaluación del planeamiento minero de minas a cielo abierto, donde se busca incorporar la incertidumbre de la información geológica en el proceso de diseño del tajo operativo y planeamiento minero, mediante la variabilidad de los parámetros internos que rigen la rentabilidad del proyecto, y así establecer un riesgo aceptable.

El desarrollo de las metodologías que se presenten en este trabajo, nos permitirá evaluar nuevos escenarios en diferentes perspectivas de análisis económico desde un enfoque geológico, de esta forma poder obtener planes con alta certeza de cumplimiento y control de riesgos asociados a la incertidumbre de la información geológica del yacimiento minero Morrenas.

1.4. Alcances y Limitaciones

La investigación presenta un alcance operativo, enfocado en el mejoramiento de la certeza de estimación de reservas del tajo Morrenas. A partir de las muestras superficiales de las variables leyes y densidad, se determina la certeza de cumplimiento de los valores obtenidos en la estimación de recursos por el método de KO, y posterior análisis de

reservas, para determinar la factibilidad de la operación desde un enfoque técnico económico. La investigación está limitada por la información del estudio de factibilidad del tajo Morrenas, realizado por Pervol (2016). Si bien es cierto, el presente estudio pretende realizar una evaluación económica del tajo Morrenas considerando la incertidumbre en la información geológica, en base a los escenarios generados a partir de la información de campo aplicando la simulación condicional para el enfoque geológico, los resultados obtenidos de la aplicación metodológica estarán principalmente relacionadas a la información obtenida de muestreos superficiales realizados antes del estudio de factibilidad.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de la incertidumbre geológica en el diseño del tajo Morrenas.

1.5.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la influencia de la certeza de leyes en el diseño del tajo Morrenas.

- b) Establecer una metodología para evaluar la influencia del contacto geológico en el diseño del tajo Morrenas.
- c) Realizar la evaluación económica del tajo Morrenas considerando la incertidumbre geológica.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.

1.6.2. Hipótesis específicas

- a) La certeza de leyes influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.
- b) El contacto geológico influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.
- c) La incertidumbre geológica influye significativamente en la evaluación económica del tajo Morrenas.

1.7. Variables

Las variables independientes (VI) del proyecto son:

VI 1: Diseño del tajo Morrenas

VI 2: Incertidumbre de la información geológica

La variable dependiente (VD) del proyecto es:

VD: Evaluación económica del tajo Morrenas

1.8. Operacionalización de variables

La presente investigación ha definido las variables independientes, dependientes y asociadas. Las siguientes tablas contienen las definiciones operativas, los indicadores y las dimensiones de cada una. El estudio de las variables nos permitirá evaluar y realizar el contraste de hipótesis de investigación; las variables independientes, representan el cambio del comportamiento matriz de la investigación (tabla 1), mientras que las variables dependientes, representan los resultados obtenidos al analizar los cambios observables y medibles (tabla 2).

Tabla 1*Operacionalización de variables independientes*

Operacionalización de la variable independiente (VI)		
Variable	Operacional	Indicadores
Diseño de tajo Morrenas	Corresponde al diseño operativo de una mina a cielo abierto considerando los parámetros económicos, operacionales, geotécnicos y metalúrgicos, además de las restricciones operativas de seguridad de acuerdo a la zonificación del estudio.	Envolvente económica operativa - Tajo determinista (Td) - Tajo esperado (Te) Mineral (t) Desmonte (t) Oz Au SR (#)
Incertidumbre geológica	Corresponde a la certeza de la información asociada a la geología del yacimiento morrenas, como la variabilidad de la zona de contacto mineral alterado (alteración morrénica), variación de leyes del Au y Ag asociados al diseño del tajo Morrenas.	Evaluación de recursos del yacimiento Morrenas - Análisis estructural - Modelo geoestadístico - Recursos Kriging Ordinario - Recursos simulación condicional

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2*Operacionalización de variables dependientes*

Operacionalización de la variable dependiente (VD)		
Variable	Operacional	Indicadores
Evaluación económica del tajo Morrenas	Corresponde a los resultados de la evaluación económica del tajo Morrenas, asociados a los parámetros económicos y técnicos del tajo Morrenas considerando la certeza de la información geológica.	Evaluación económica - VAN determinista (VANd) - VAN esperado (VANE)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Operacionalización de variables asociadas

Operacionalización de variables asociadas		
Variable	Operacional	Indicadores
Modelo económico	Corresponde a los parámetros económicos.	Precio Au Precio Ag Costos de venta (USD/g) Costos de minado mineral (USD/t) Costos de minado desmonte (USD/t) Costo de procesamiento (USD/t)
Modelo geológico	Corresponde al modelo geológico de alteraciones del yacimiento Morrenas.	Modelo de alteración Densidad (m ³ /t)
Modelo geotécnico	Corresponde a los parámetros geotécnicos del tajío Morrenas.	Cara Talud (°) IRA (°) Zonificación
Modelo metalúrgico	Corresponde a los parámetros de recuperación de la alteración Morrenas.	Recuperación Au (%) Recuperación Ag (%)
Operaciones	Corresponde al método de explotación, control operacional de minado.	Topografía Método de explotación Ancho mínimo de operación

Fuente: Elaboración propia.

Las variables asociadas, como el modelo económico, geológico, geotécnico, metalúrgico y operaciones; son variables que interfieren directamente en los resultados, sin embargo, no se consideran como materia de estudio, por tanto, es tratada como información.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Los estudios realizados referente a la integración de la incertidumbre desde un enfoque geológico, hace referencia al impacto de condiciones geológicas como el comportamiento estructural de las leyes del yacimiento, generadas por el soporte del modelo, naciendo principalmente por una falta de información del fenómeno geológico observado y de la variabilidad intrínseca del depósito, impactando en la continuidad espacial de las leyes. Para su caracterización completa se recurre a estimaciones e interpretaciones de las distintas variables de estudio, sin embargo, para aumentar la certeza se debe invertir más en la obtención de información, por lo que es necesario evaluar hasta qué punto se debe considerar un riesgo aceptable de acuerdo al beneficio del proyecto, por consiguiente, es necesario la aplicación de la simulación condicional, porque nos permite estudiar los resultados más probables, para definir el riesgo aceptable. En consecuencia, el presente estudio, buscar integrar la incertidumbre desde un enfoque geológico, a la

evaluación económica de la explotación del tajo Morrenas, para asegurar la rentabilidad de la operación.

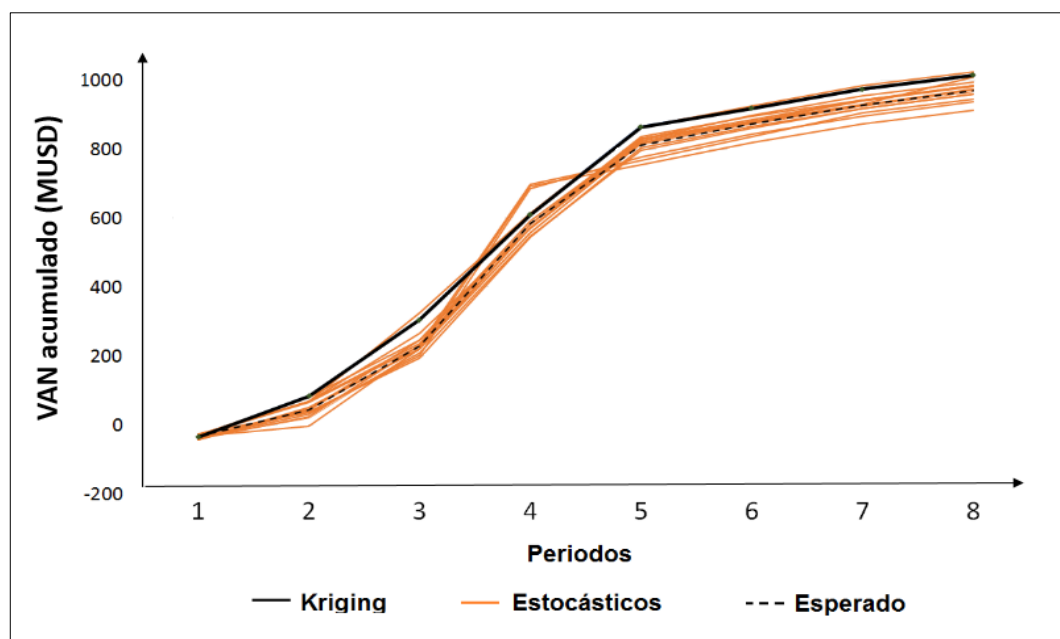
Prieto (2019) presenta un modelo de optimización que considera varios escenarios equiprobables para mejorar el plan de minado, en base al riesgo que asume la organización respecto a variables económicas y geológicas. Donde se logra comprender el comportamiento del modelo estocástico y controlar la incertidumbre respecto al target de producción. Concluyéndose en que el modelo de optimización estocástica busca explotar bloques con mayor probabilidad de ocurrencia, bajo restricciones operacionales como diseño y secuenciamiento del plan de minado.

Franco (2017) propuso un modelo que permite incluir las variables de decisión en referencia a la vida de la mina, capacidades y ley de reserva dinámicas en el tiempo; con la finalidad de maximizar el VAN, minimizar la desviación estándar del VAN de acuerdo a límites aceptables establecidas por la organización, y maximizar la probabilidad de ocurrencia; aplicando criterios de incertidumbre geológica y económica.

Ordeñana (2017) realizó un estudio para incluir la incertidumbre geológica en diseño del tajo final, a partir de 20 simulaciones estocásticas

equiprobables, buscando replicar la variabilidad de las leyes del depósito mineral; donde obtiene una probabilidad 0,046 % de cumplimiento del VANd óptimo (1 016 MUSD), y un VANE de 1 063 MUSD, logrando un incremento de 8,74 % respecto al VANd esperado, con una probabilidad de 80 % de ocurrencia.

Figura 2
VAN de modelos estocásticos y determinístico

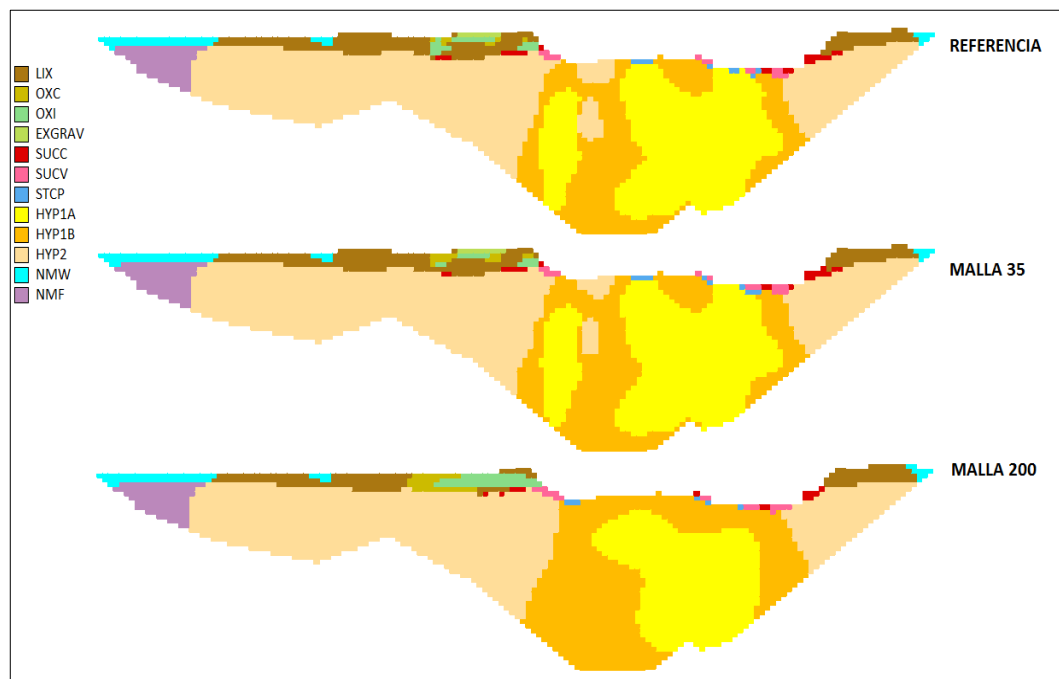


Fuente: Ordeñana, 2017.

Letelier (2012) propone la metodología para evaluar la incertidumbre generado por la densidad de malla de un pórfido cuprífero en la Mina Spence; consiste en generar un modelo base de referencia a partir de los

sondajes originales, con malla aproximadamente de 100 m, para posteriormente definir grupos de mallas de sondajes de distinta densidad, sin información, para ser asignadas con la información del modelo de referencia. En base a las nuevas densidades de sondajes se construyen nuevos modelos, con un soporte de 30 simulaciones. Para luego, evaluar las desviaciones de cobre fino, plan minero y VANd del proyecto. Y como era de esperar, a una menor densidad de malla se obtuvo una mayor probabilidad de error, concluyéndose que la densidad de malla 100 es adecuada para la definición de recursos medidos del negocio minero.

Figura 3
Comparación de mineralización



Fuente: Letelier, 2012.

Villa Muñoz (2012) En el proyecto Quetena de Codelco evalúa la incertidumbre del precio del cobre en la planificación minera de largo plazo, debido a la cantidad de recursos con baja ley, lo que implica una alta sensibilidad del proyecto frente al precio del cobre. El proyecto Quetena logró una flexibilidad del 12,9 % a un precio de 250 UScD/lb Cu. La metodología se basó en la construcción de diferentes árboles de escenarios, con la finalidad de obtener planes más robustos y flexibles, en referencia al precio. Donde se descubrió, que cuando el precio promedio de largo plazo disminuye, el valor de la flexibilidad en los planes aumenta; por lo que presenta un mayor impacto en el horizonte estratégico. En consecuencia, se logra afirmar que el realizar un análisis temprano, permite generar planes con mayor capacidad de respuesta a la contingencia del precio.

Peirano (2011) afirma que, al integrar la incertidumbre como una variable dentro de las condiciones del problema, logra enriquecer la línea de pensamiento y expandir la toma de decisiones, bajo parámetros de riesgo, permitiendo resguardarse de los impactos con probabilidad de ocurrencia. Por lo tanto, se concluye que la evaluación estocástica genera una nueva visión y complementa el análisis necesario para sumar un

escenario más amplio al considerar la incertidumbre asociada en la metodología tradicional de la definición del tajo final.

McCarthy (2003) Realizó estudios de las desviaciones de cumplimiento del plan minero en 105 faenas, identificando las principales causas, y llega a la conclusión de cómo influye cada factor de incertidumbre, respecto a la geotécnica (9 %), procesos metalúrgicos (15 %), estimación de recursos (17 %), diseño y planificación de minas (32 %). Sin embargo, indica que la estimación de recursos tiene un impacto real cercano al 66 %, por lo tanto, el diseño y la planificación dependen de la estimación de recursos confiables y su error está relacionado directamente con el error del modelo geológico. Dominy, S., Noppé, M. y Annels, A. (2004) investigaron las razones detrás de los errores en la estimación de recursos y su impacto en el sector minero. Encontraron que una variación del 10 % en la ley del modelo puede reducir el VAN del proyecto entre el 20 % y el 40 %.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Ubicación de tajo Morrenas

El proyecto minero Morrenas está dentro de las operaciones de la Unidad Minera Pucamarca. Se encuentra en el distrito de Palca, en la provincia y departamento de Tacna. Aproximadamente 1 370 km al sur de Lima y a 99 km al norte de Tacna. Se encuentra cerca del hito 52 de la frontera peruano chilena en las coordenadas UTM 414 800 E y 8 029 800 N, a una altitud de 4 350 msnm, en la carta topográfica nacional 36X. El acceso por vía terrestre desde la ciudad de Tacna dura aproximadamente 2,33 h, por la carretera Tacna Alto Perú, pasando por el centro poblado de Palca y luego continúa siguiendo la misma ruta por el camino que va al río Azufre hasta el Paso Huaylillas Norte, desde donde se debe seguir la ruta hasta el proyecto, realizando un recorrido de 99 km (Cabrera, 2015).

2.2.2. Geología regional

La geología regional está definida por la estratigrafía del Mesozoico y Vulcanismo Eoceno a Mioceno, las diferentes unidades estratigráficas sedimentarias afloran al Oeste y Noroeste del yacimiento Checocollo.

Respecto a estratigrafía del Mesozoico, las unidades del Triásico superior – Jurásico, están constituidos por rocas carbonatadas y rocas silicoclásticas que pertenecen a varias unidades estratigráficas.

Las unidades del Cretáceo son la Formación Hualhuani compuestas por estratos potentes de areniscas cuarzosas o cuarcitas de grano medio y la Formación Chulluncane está conformada mayormente por conglomerados y grauwacas con clastos de roca mayormente volcánica, ocasionalmente clastos de areniscas y calizas.

En el entorno y al Norte de Pucamarca, los afloramientos de esta unidad ocupan la mayor parte del cerro Chulluncane, dominado por secuencias grano decrecientes, una secuencia típica está conformada por conglomerados como la litología dominante, con clastos de cuarcita (40 %), caliza (20 %), arenisca (20 %) rocas intrusivas (10 %) lutitas, cuarzo y gneis (10 %) todos estos clastos están inmersos en una matriz arcósica de grano medio a grueso, con cemento calcáreo.

Respecto al vulcanismo Eoceno a Mioceno, la Formación Huilacollo litológicamente se compone de derrames y volcanoclásticos, gran parte de las rocas son de composición andesita, asimismo están constituidos por depósitos de flujos de masas estratificadas, derrames de lavas y diques, probablemente de edad Oligoceno. La Formación Huaylillas, consiste en tufos ácidos de composición dacítica y riolítica con cierta diferencia de color, textura y mineralogía, las rocas están compuestas de cristales rotos

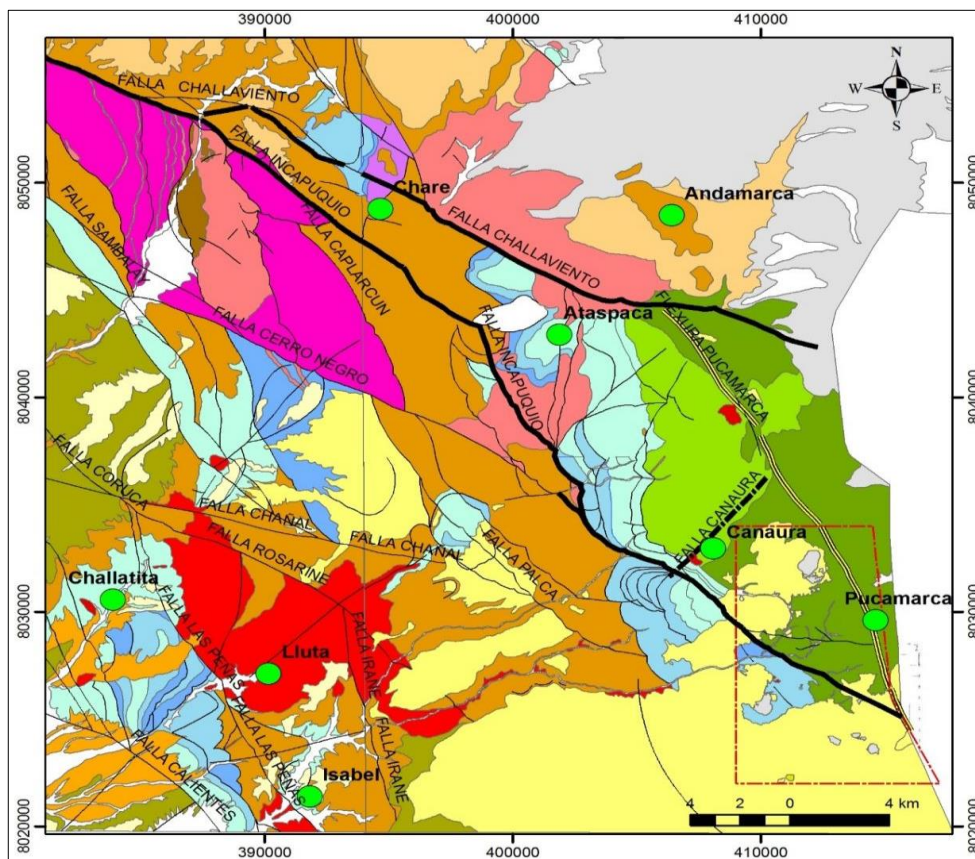
de cuarzo dentro de una matriz feldespática fina, algunos contienen pequeños cristales de biotita y es muy común los fragmentos de pómez, esta unidad se le considera del Mioceno inferior a medio. El Grupo Barroso en general está constituido por andesitas y traquiandesitas intercaladas con rocas piroclásticas.

Respecto al Plutonismo Cretáceo – Mioceno, los intrusivos más importantes están ubicados a ± 12 a 15 Km al ONO de Pucamarca, la mayor parte de las rocas consiste en granodiorita, y en zonas más próximas a Pucamarca se encuentran diques con una dirección promedio N-S que atraviesan generalmente a las secuencias de la Formación Huilacollo

Respecto al Triásico Superior – Jurásico, Se correlacionó las rocas que yacen sobre el basamento metamórfico, es decir, las formaciones Chocolate, Socosani y el Grupo Yura del intervalo Hettangiano-Barremiano que son considerados como similares a los estratos de las formaciones Pelado, San Francisco y Ataspaca de similar edad. De similar modo comparativo, las rocas del Grupo Toquepala, y las formaciones Chulluncane y Quellaveco del Cretácico inferior y Paleógeno inferior en Tacna, las que son comparadas con sus similares en el norte de Chile.

Respecto al Cretácico se comprende la Formación Hualhuani del tope del Grupo Yura, y a la parte inferior del Grupo Toquepala. En la figura 4, se observa sedimentos involucrados que podrían conformar el basamento de las rocas vulcano clásticas y volcánicas de la Formación Huilacollo en la zona de Pucamarca.

Figura 4
Mapa geológico regional



Fuente: Pervol, 2016.

2.2.3. Geología local

La geología local, nos permite conocer las propiedades y características que hayan permitido la formación del yacimiento mineralizado, los que sirven de guías para ubicar otros yacimientos; comprende una secuencia volcánico-clástica de composición andesítica y dacítica de la formación Huilacollo, que ha sido afectada por un proceso de brechamiento freático, debido a la intrusión del stock irregular del pórfido cuarífero en el cerro Checocollo; y por un pórfido andesítico en el cerro Caldero (Cerón, 2010).

Por tanto, el yacimiento es definido como un sistema epigenético de alta sulfuración, que originó un diseminado de oro, producto de la silicificación; esta estructura también es conocida como diatrema. La geología local está representada por los volcánicos Huilacollo, pórfido andesítico, pórfido de cuarzo, brecha híbrida, tufo brecha y tufo fragmental. La secuencia brecha híbrida, está fuertemente obliterada por varios eventos diastróficos y de alteración hidrotermal. La geología del tajo Morrenas en su totalidad es material morrénico. Según el análisis de las muestras está compuesto por 49 % de finos (Cerón, 2010).

La mina Pucamarca presenta mineralización de sulfuros y metales preciosos en la fase de óxidos. En el cerro Caldero, la mineralización sulfídica se presenta como granos esparcidos y venillas discontinuas en el pórfido feldespático, como la pirita, bornita, covelina, calcocita y calcopirita. Mientras que en la fase de metales preciosos se presenta en una posición de pseudo estratificación y están cercanas a las zonas con fuerte control estructural y que a su vez han sido fuertemente silicificadas, donde la mineralización está dada por el Au, Ag, Ba y alunita (Cerón, 2010).

La mineralización de sulfuros en el cerro Checocollo se presenta en forma de parches aislados de calcocita, bornita, covelina y pirita subordinada. Esta ocurrencia no es común y solo ocurre en las partes altas del sistema y en áreas con baja silicificación y presencia de alunita. Se puede encontrar mineral oxidado como limonita, hematita, jarosita, turgita y gohetita en el cerro Checocollo, con aspecto pulverulento y como patinas. El oro de tamaño menor a una micra se encuentra naturalmente.

El azufre nativo, el cinabrio, el rejalgar y el oropimente son minerales de ganga que acompañan la mineralización, siendo esta asociación típica de un ambiente epitermal de alta sulfuración. La Ag en algunos casos está asociada con el oro y sulfosales como la jarosita en minerales de electrum

y argento-jarosita, respectivamente. Y la presencia de minerales de Cu en las partes profundas de Checocollo y en la parte intermedia a profunda de Caldero (Pervol, 2016).

2.2.4. Sistema estructural

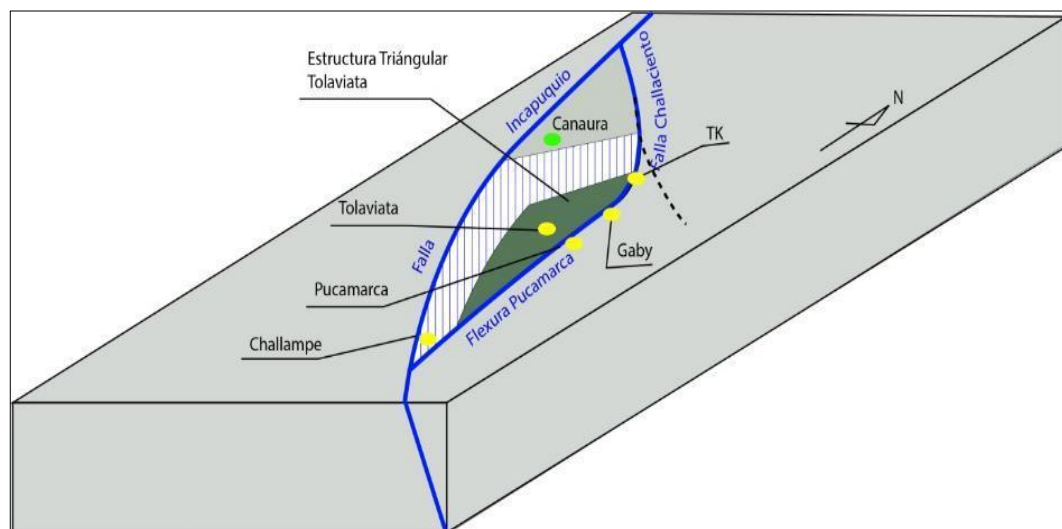
El sistema estructural está representado por las principales fallas y estructuras regionales, definiéndose 5 estructuras principales.

- a) Falla Incapuquio, con dirección NO-SE, es considerada como una falla transcortical, esta falla entre Pucamarca y Canaura pone en contacto a las secuencias de la Formación Huilacollo con la Formación Socosani, teniendo varios movimientos transcurrentes con componente normal e inverso.
- b) Falla Challaviento, con dirección N120°, esta falla pone en contacto a los intrusivos Challaviento con las secuencias del Grupo Yura, asimismo esta falla controlaría el emplazamiento del volcán Tacora. El movimiento de esta falla es transcurrente sinistral.
- c) Flexura de Pucamarca, con dirección próxima a N-S y concuerda con los sistemas de fracturas, lineamientos, diques y emplazamiento de la

mineralización que existe en Pucamarca, el movimiento de la falla es interpretado como normal y transcurrente.

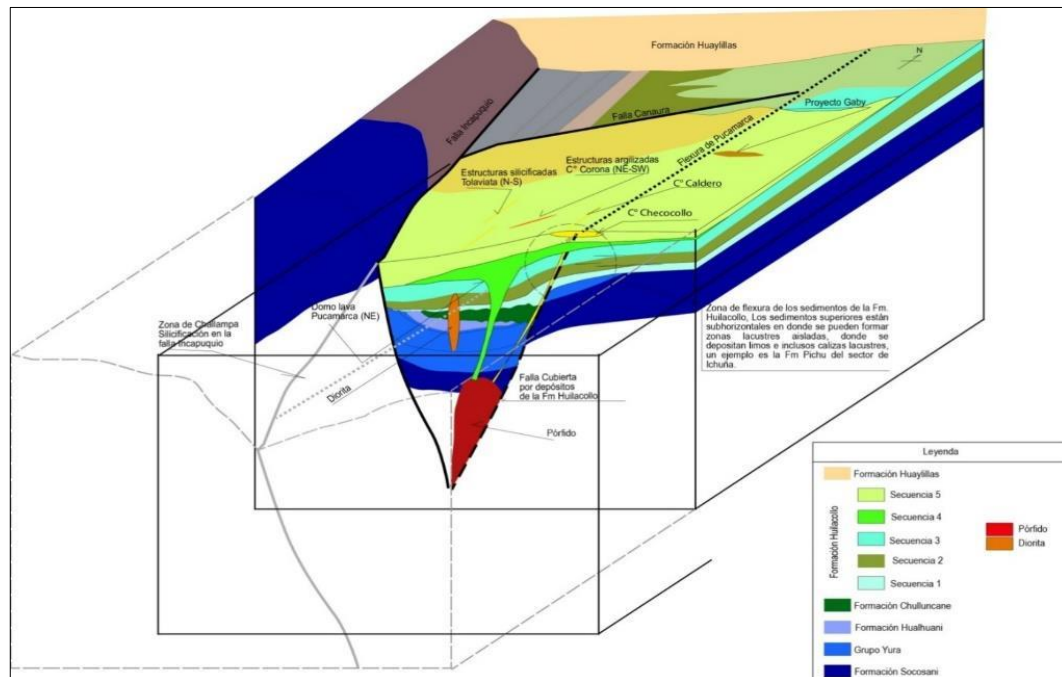
- d) Falla Canaura, corresponde a estructuras de dirección NE-SO (N40°), su proyección al NE, puede ser evidenciada hasta la flexura de Pucamarca, en tanto que al SO se le puede seguir hasta la Falla Incapuquio. Las reactivaciones de la Falla Canaura afectan a la Formación Huilacollo con un movimiento normal dextral.
- e) Estructura romboédrica regional, las fallas regionales descritas anteriormente, conforman una estructura romboédrica de dirección NO-SE.

Figura 5
Esquema de la estructura triangular Tolaviata



Fuente: Pervol, 2016.

Figura 6
Esquema de la estructura pull apart Pucamarca

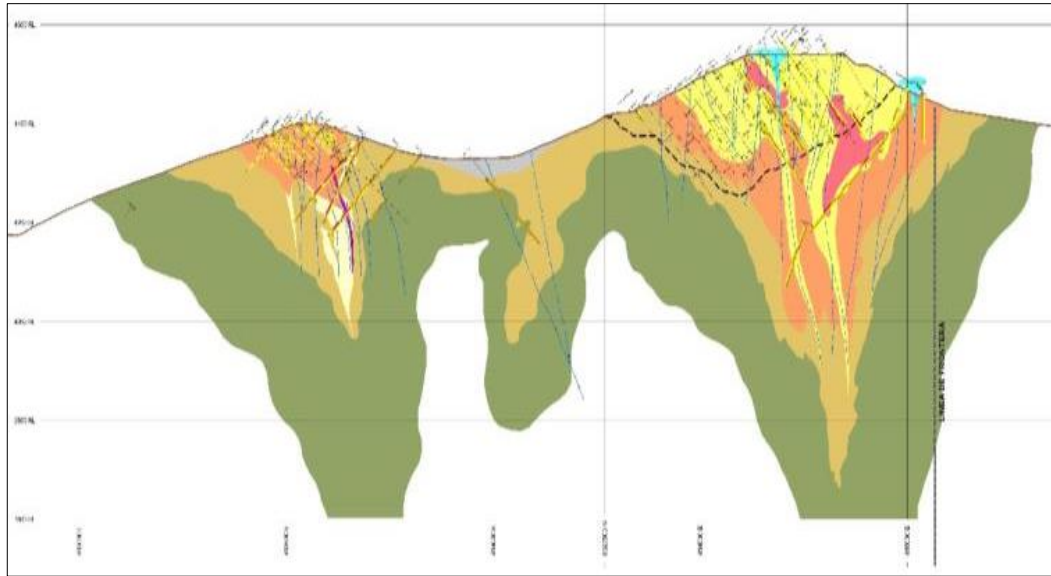


Fuente: Pervol, 2016.

2.2.5. Alteración hidrotermal

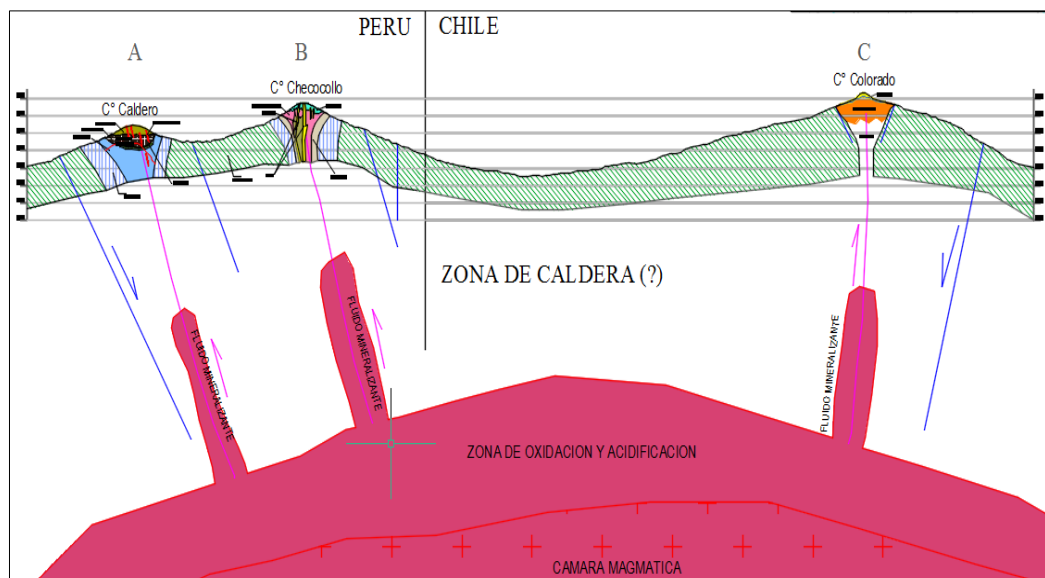
El tipo de depósito mineral de Checocollo, está catalogado como depósito de yacimiento Epitermal de Alta Sulfuración Pucamarca, comprende de fragmentos de Volcánico Andesítico obliterado con alteración de sílice masiva, Vuggy, sílice granular y Argílica avanzada, fragmentos de Toba riodacítica con alteración sílice masiva, Vuggy, sílice granular, Brecha mayoritariamente.

Figura 7
Sección longitudinal del Zoneamiento de alteración hidrotermal



Fuente: Pervol, 2016.

Figura 8
Zoneamiento de yacimientos epitermal de Au y Ag



Fuente: Pervol, 2016.

La alteración hidrotermal está referido a la presencia con alteración en las masas rocosas propios del yacimiento epitermal Pucamarca mayoritariamente se muestra Sílice Masiva, y Sílice Vuggy tanto de rocas andesíticas como las de la Toba riodacítica.

- a) Sílice masiva (SI_MA), es la cementación con sílice a la brecha polimíctica, toba riodacítica y como relleno en algunas estructuras. Está al centro y sureste del tajo, presencia débil.
- b) Sílice pulverulenta (SI_PU), presente en las estructuras como sílice molida, tiene aspecto de arenilla fina. Distribuido al Centro y Este del tajo, presencia débil a escasa.
- c) Sílice granular (SI_GR), presente en algunas estructuras como relleno hidrotermal y dispuesta en granos finos, asociada a vuggy sílica y sílice masiva, relacionada a la brecha polimíctica. Está distribuida irregularmente en el interior del tajo y con la dirección de estructuras, presencia moderada.
- d) Vuggy sílica (VUG), sílice oquerosa, reemplaza con sílice la matriz feldespática y lixivia los fenocristales de la andesita, toba riodacítica y clastos de brechas; usualmente se asocia a la sílice - alunita (argílica

avanzada) hacia la periferia del tajo. Se dispone en todo el tajo en forma irregular; presencia moderada.

- e) Argílica avanzada (AAR), representada en dos ensambles, ensamble de sílice – alunita – caolinita se presenta en el interior del tajo (asociada a vuggy sílice), profundiza en halos sobre las estructuras, ensamble de sílice – pirofilita – dickita se presenta en el interior del tajo, próxima a los feeders, desarrolla débil textura patchy (asociada a sílice masiva).
- f) Argílica intermedia (AR), distinguida por el ensamble illita – smectita – caolinita, tipo de alteración principalmente en clastos de andesitas de las brechas, andesitas y volcanoclásticos, expuesta en halos próxima a estructuras postmineral, dominante en los bordes del tajo.
- g) Sílica Clay (SIC), tipo de alteración asignado a la silicificación representa >70 % de alteración de la roca, la presencia de arcillas ha sido identificado mediante espectroscopía de reflectancia. El ensamble mineral característico para esta alteración sílice > alunita, pirofilita, ±dickita, el estilo de la alteración que presenta es la sílice generalmente en las matrices de las rocas volcanoclásticas y andesitas porfiríticas, la presencia de alunita - arcillas se presenta en los clastos de las rocas volcanoclásticas y fenocristales de plagioclasas, el estilo de esta

alteración cuando se presenta en las areniscas volcanoclásticas (masiva, laminada) es selectivo pervasivo.

- h) Propilitización (PROP), tipo de alteración cuyo ensamble está conformado por clorita, epidota y calcita, dicha alteración se encuentra en la parte externa de los yacimientos Checocollo – Cerro Caldero.

En la tabla 4, se muestra los parámetros geomecánicos recomendados para el diseño del tajo Morrenas, estos parámetros nos permitirá obtener diseños que no presenten problemas de inestabilidad en las condiciones de análisis, considerando los parámetros geotécnicos.

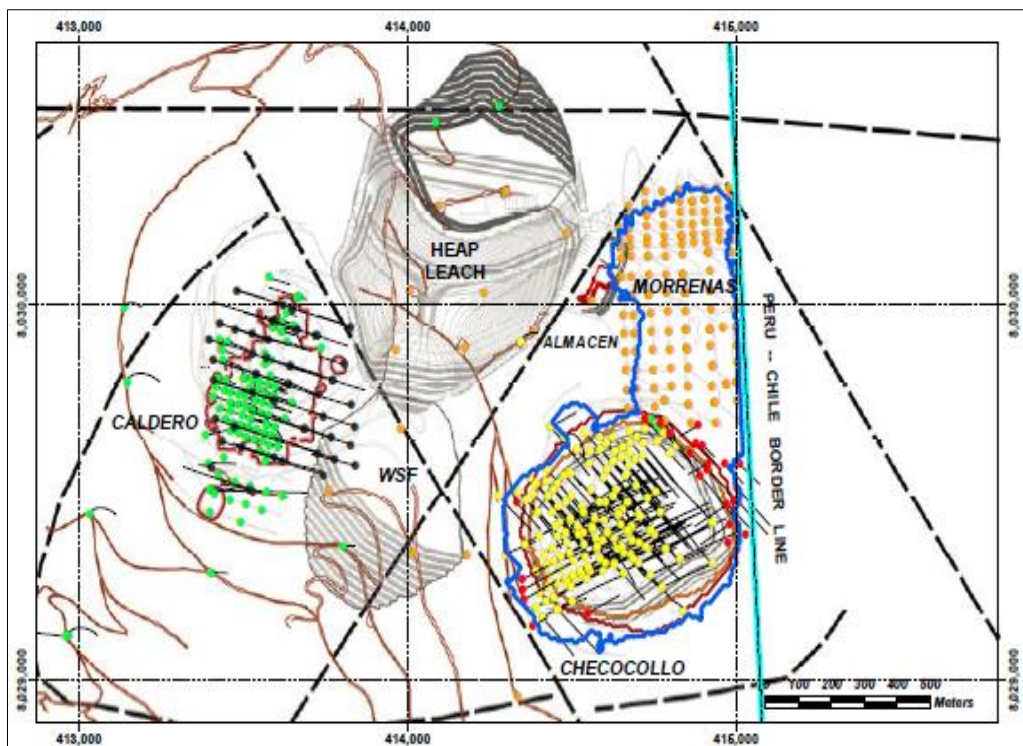
Tabla 4
Parámetros geotécnicos de diseño tajo Morrenas

Litología	Banco (m)	IRA (°)	BFA (°)	Berma (m)	Altura máxima talud interrampa (m)
Zona Norte	7,5	20	50	14,3	100
Zona Este	7,5	34	50	4,8	100
Zona Oeste	7,5	34	50	4,8	100
Zona Sur	7,5	34	50	4,8	100

Fuente: Pervol, 2016.

Con respecto a los parámetros geomecánicos para el diseño del tajo Morrenas el IRA va desde los 20° a 34°, obtenidos en el estudio de factibilidad del tajo Morrenas, son aplicables sólo con la configuración geométrica del tajo considerado para la evaluación. La evaluación de recursos mineros se realizó considerando la información de sondajes diamantinos y aire reverso de la zona Checocollo, Morrenas y Caldero (figura 9), considerando las prácticas internacionales según el código JORC.

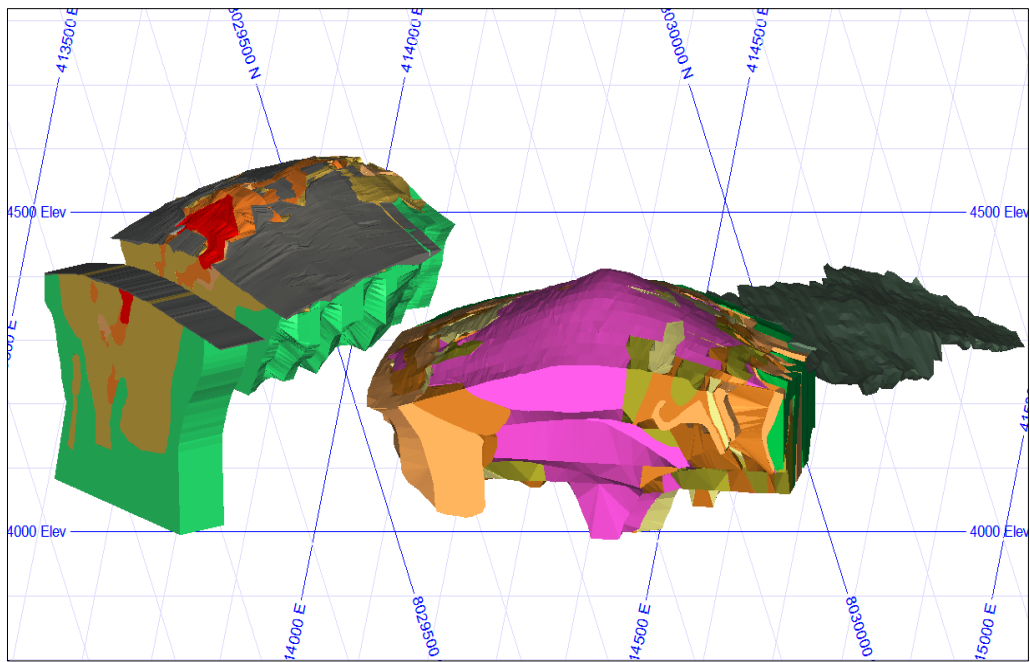
Figura 9
Soporte de estimación de recursos mineros



Fuente: Pervol, 2016.

A diferencia de las evaluaciones precedentes, la actual se realizó sobre el modelo de alteraciones, como la AAR, AR, PR, SIGR, SIMA, SIPU, VUG y UA; para la estimación de la zona de Morrenas se considerada el material MORR como homogénea (figura 10).

Figura 10
Modelo de alteraciones de cuerpos epitermal



Fuente: Pervol, 2016.

Los recursos minerales del tajo Checocollo y Morrenas fueron evaluados utilizando los métodos geoestadísticos; la metodología usada para la interpolación de leyes en el modelo de bloques 10x10x7,5 m, fue el Kriging Ordinario. Tomando en cuenta, que la estimación de reservas es la base para realizar los diseños de tajo y el plan de minado, se utilizaron

parámetros financieros que incluyen precios de los metales, recuperación del oro, costos operativos e inversión de capital de sostenimiento en base al programa de producción y requerimiento de equipos.

Tabla 5
Recursos minerales en tajos sin Cut off

Zonas	Medido			Indicado			Inferido		
	Tonelaje	Au	Oz Au	Tonelaje	Au	Oz Au	Tonelaje	Au	Oz Au
	(Mt)	(g/t)	(koz)	(Mt)	(g/t)	(koz)	(Mt)	(g/t)	(koz)
Checocollo	28,96	0,45	423,32	48,8	0,28	444,46	80,51	0,12	320,43
Morrenas	0,05	0,48	0,92	11,04	0,53	187,78	1,25	0,5	20,15
Caldero	5,74	0,29	53,82	21,15	0,14	94,05	83,37	0,08	222,38
Total	34,77	0,43	478,08	80,99	0,28	726,31	165,14	0,11	562,97

Fuente: Pervol, 2016.

Tabla 6
Recursos minerales en tajos con Cut off

Zonas	Medido			Indicado			Inferido		
	Tonelaje	Au	Oz Au	Tonelaje	Au	Oz Au	Tonelaje	Au	Oz Au
	(Mt)	(g/t)	(koz)	(Mt)	(g/t)	(koz)	(Mt)	(g/t)	(koz)
Checocollo	24,83	0,52	413,45	33,44	0,39	414,36	29,41	0,26	243,22
Morrenas	0,05	0,53	0,89	10,41	0,55	185,53	1,15	0,54	19,82
Caldero	4,89	0,33	52,27	10,2	0,23	75,68	19,06	0,21	126,04
Total	29,78	0,49	466,62	54,07	0,39	675,57	49,63	0,24	389,09

Fuente: Pervol, 2016.

En la tabla 5, se observan los recursos minerales del tajo Checocollo, Morrenas y Caldero, reportados a noviembre del 2015 sin Cut off; y en la tabla 6, los recursos calculados con el precio de Au de 1 300 USD/oz; y con una ley de corte de 0,12 g Au/t para Checocollo y Caldero; y 0,16 g Au/t para Morrenas.

Los recursos totales in-situ de Checocollo a noviembre 2015, con Cut off de 0,12 g Au/t, es de 87,7 Mt con leyes de 0,38 g Au/t y 4,7 g Ag/t. La zona de Morrenas, con un Cut off de 0,16 g Au/t, es de 11,6 Mt de recursos totales in situ con leyes 0,55 g Au/t y 4,04 g Ag/t.

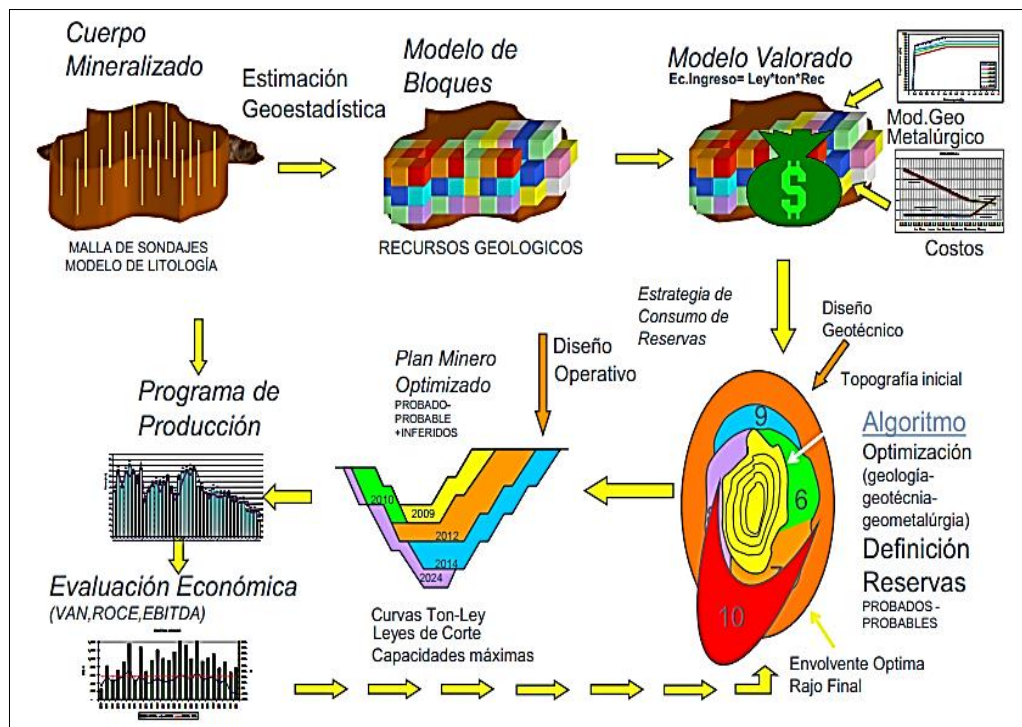
2.2.6. Optimización de tajos

La optimización de los tajos se lleva a cabo empleando el programa NPV Scheduler y Whittle; con ese proceso, se generan diversos tajos anidados económicos y se evalúa el tajo óptimo en función del máximo valor del tajo abierto que resulta en el mayor valor presente neto del flujo de caja de la mina. Esta evaluación considera la sensibilidad de los precios, recuperación metalúrgica, parámetros de diseño, REM, diseño geométrico de sectores, ratios de influencia de seguridad y permisos.

2.2.7. Planificación determinística

La planificación minera determinista es aquella que no considera la incertidumbre de las variables como parámetro de evaluación, obteniendo como resultado un plan minero sesgado.

Figura 11
Planificación determinista



Fuente: Gonzáles, 2015.

En la figura 11, se observa el diagrama de proceso correspondiente a la planificación determinista, donde sus principales características son:

- Solo considera el valor previsto del precio del metal.
- Entrega un plan para la minería.
- Tiene un VAN determinístico asociado.

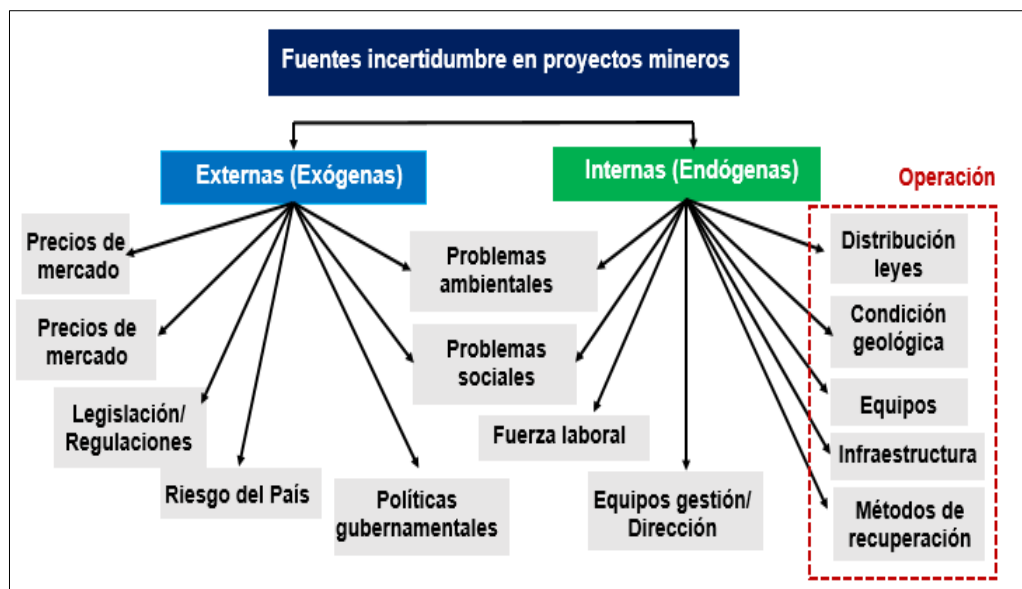
2.2.8. Incertidumbre geológica

La metodología tradicional de planificación a cielo abierto considera que todos los parámetros utilizados son conocidos, por lo tanto, el plan de producción que genera será determinístico. Sin embargo, las condiciones del mundo real están lejos de ser fijas, y en la práctica en todas las etapas de planificación existe un grado de incertidumbre en los parámetros considerados. Según la fuente de la incertidumbre, podemos clasificarlas en incertidumbre en el mercado, geológica y operacional. La incertidumbre geológica está relacionado principalmente a la distribución de leyes, tonelaje de reservas, continuidad de las unidades geológicas y variabilidad de mineralización.

En la figura 12, se puede observar las fuentes de incertidumbre más relevantes que pueden influir en los proyectos mineros, y específicamente en la operación del proyecto que afecta directamente a la rentabilidad del negocio minero. Después de identificar y clasificar los riesgos, se realiza

un análisis de estos, es decir, se estudia la probabilidad y las consecuencias de cada factor de riesgo para establecer el nivel de riesgo global del proyecto.

Figura 12
Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros

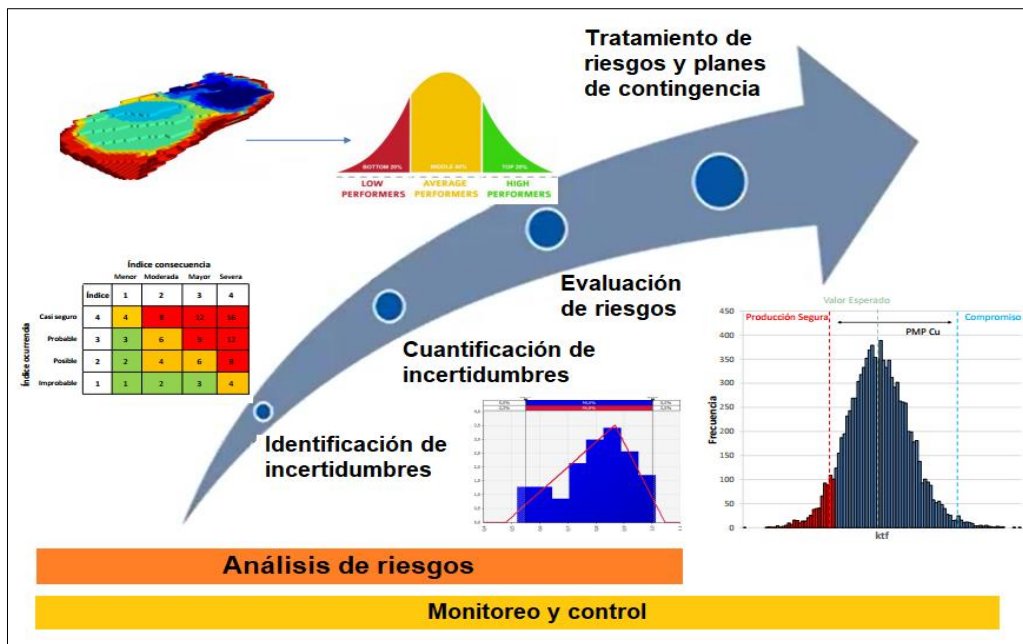


Fuente: Cerda, 2016.

Un método utilizado para hacer frente a las incertidumbres y a los riesgos asociados a éstas, es la aplicación de un análisis de escenarios (Mun, 2006). La metodología de gestión de riesgos permite determinar si es posible cumplir con los compromisos derivados del plan minero e incluso fijar estos compromisos en función del nivel de riesgo deseado. De la misma forma elegir entre varias alternativas productivas no solo

considerando su producción esperada u otros indicadores, sino también sus niveles de riesgos, adecuándose así al perfil de la compañía y justificar inversiones para mitigar los riesgos de la operación e incrementar así la probabilidad de cumplimiento del plan (figura 13).

Figura 13
Proceso de Gestión de Riesgos



Fuente: Lichtin, 2016.

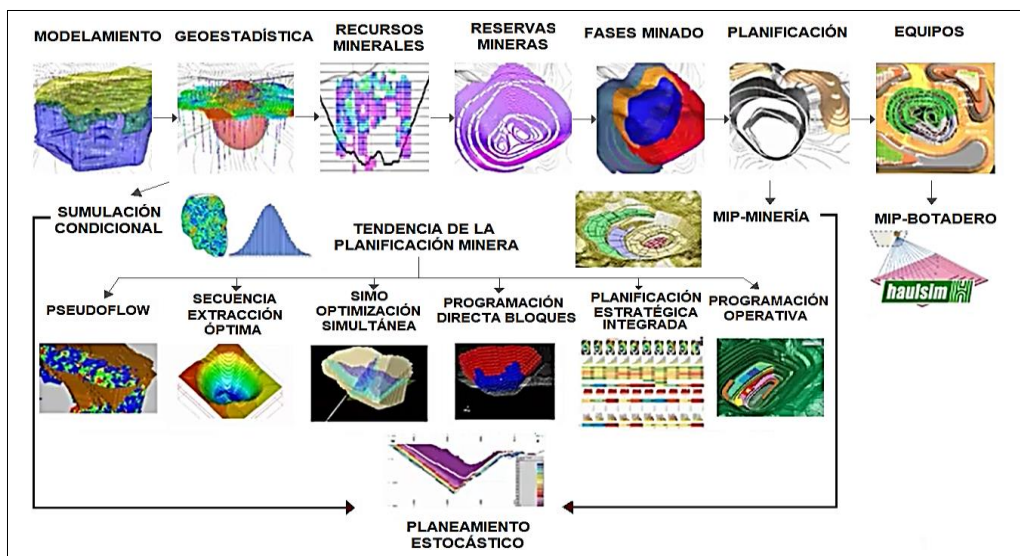
Al desconocer la naturaleza variable de estos parámetros, existen problemas para cumplir con el objetivo del valor que se realiza al inicio de la operación. De esta forma, se han buscado alternativas que logren integrar el comportamiento estocástico de los parámetros mencionados.

2.2.9. Planificación estocástica

A diferencia de la planificación minera determinista, la planificación minera estocástica considera la incertidumbre en al menos uno de sus parámetros, en este caso, el precio del metal. Es importante tener en cuenta que se considera un conjunto S de escenarios potenciales para las series de precios del metal. Sus principales rasgos son:

- Consideración de S escenarios, asociado a cada precio.
- Entrega como resultado de S planeamiento minero.
- Tiene un VAN asociado, denominado VAN estocástico.

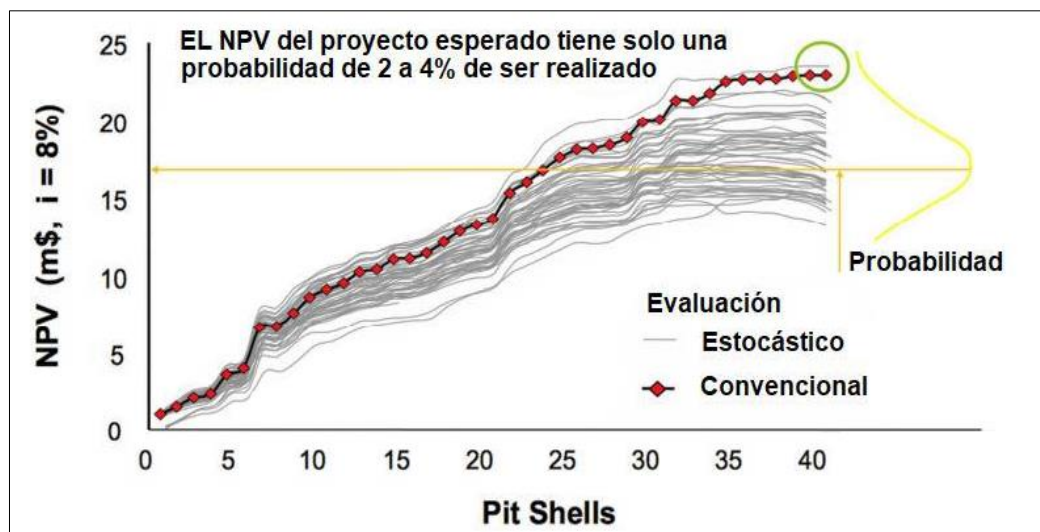
Figura 14
Proceso de la planificación estocástica



Fuente: García, 2020.

Como resultado, cuando se comparan la planificación minera estocástica y determinista, la comparación económica es directa porque ambas técnicas de planificación producen un VAN asociado. Pero al hacer la comparación minera, esta es más difícil de realizar, ya que debe compararse el plan determinista respecto a los S planes estocásticos (figura 15).

Figura 15
Planificación estocástica versus determinista



Fuente: Dimitrakopoulos, 2011.

En la figura 15, se demuestra cómo la realización de un proyecto basado únicamente en el análisis convencional del depósito conduce a decisiones sobreestimadas debido al efecto del suavizamiento del Kriging,

presenta una baja probabilidad de ocurrencia y, como resultado, se selecciona un tajo final inadecuado. En este caso, el valor real previsto del proyecto es alrededor de 17 millones de dólares, mientras que el análisis convencional indica un valor de 25 millones de dólares con una probabilidad de ocurrencia optimista del 4 %. En primer lugar, busca que el plan minero a construir sea robusto a las incertidumbres incluidas, lo que implica que su VAN esperado sea superior al de otros planeamientos mineros, al evaluar el plan para muchos futuros posibles. Adicionalmente, el plan minero puede poseer flexibilidad para responder a las incertidumbres incluidas, de esta forma minimizamos los escenarios negativos (GEMS, 2013).

2.2.10. Evaluación económica

De acuerdo a las variables de estudio y decisión, la evaluación económica de los escenarios se realiza mediante la aplicación de las siguientes expresiones correspondientes al ingreso de la información al programa Simched PO.

$$Tb = Vb . Dens \quad [1]$$

Donde:

- T_b es el tonelaje del bloque en t.
- V_b es el volumen del bloque en m^3 .
- Dens es la densidad en t/m^3 .

$$G_{Au Eq} = T_b \cdot Ley_{Au Eq} \quad [2]$$

Donde:

- $G_{Au Eq}$ en la cantidad de oro en g.
- T_b es el tonelaje del bloque en t.
- $Ley_{Au Eq}$ es la ley del oro equivalente en g/t.

$$VEP = (G_{Au Eq} \cdot (P_{Au} - C_{vAu}) - T_b \cdot (C_{mm} + C_p)) \quad [3]$$

Donde:

- VEP es el valor económico del proceso en USD.
- $G_{Au Eq}$ en la cantidad de oro en g.
- T_b es el tonelaje del bloque en t.
- P_{Au} es el precio del oro en USD/g.
- C_{vAu} es el costo de venta del oro en USD/g.
- C_{mm} es el costo de minado del mineral en USD/t.

- Cp es el costo del procesamiento del mineral en USD/t.

$$VEW = -Tb .(Cmd)$$

[4]

Donde:

- VEW es el valor económico del desmonte en USD.

- Tb es el tonelaje del bloque en t.

- Cmd es el costo de minado del desmonte en USD/t.

Figura 16
Ingreso de parámetros por escenarios de estudio

The screenshot shows the 'PIT OPTIMIZATION' software interface. It includes a menu bar with 'MODEL' and 'PIT OPTIMIZATION', and a toolbar with icons for General, Destinations, Constraints, Overview, Save As, and Run. The main window is divided into several sections:

- General:** Contains 'Optimization mode' (Direct Block Scheduling, Only Pit Optimization), 'Densities (t/m³)' (Field: Dens, Default value: 2.15), 'Slope angles (degrees)' (Field: <none>, Default value: 28), 'Economic parameters' (Discount rate (%): <none>, Stockpiling (\$/t), Fixed mining cost, Rehandling cost), and 'Operational constraints (m)' (Minimum width (m) Mining: 50, Bottom: 50; Vertical rate of advance (m) Preferred: 45, Maximum: 90).
- Destinations:** A table with columns: Name, Type, Recovery (AlUeq), Economic value (\$), and Stockpile limit (t).

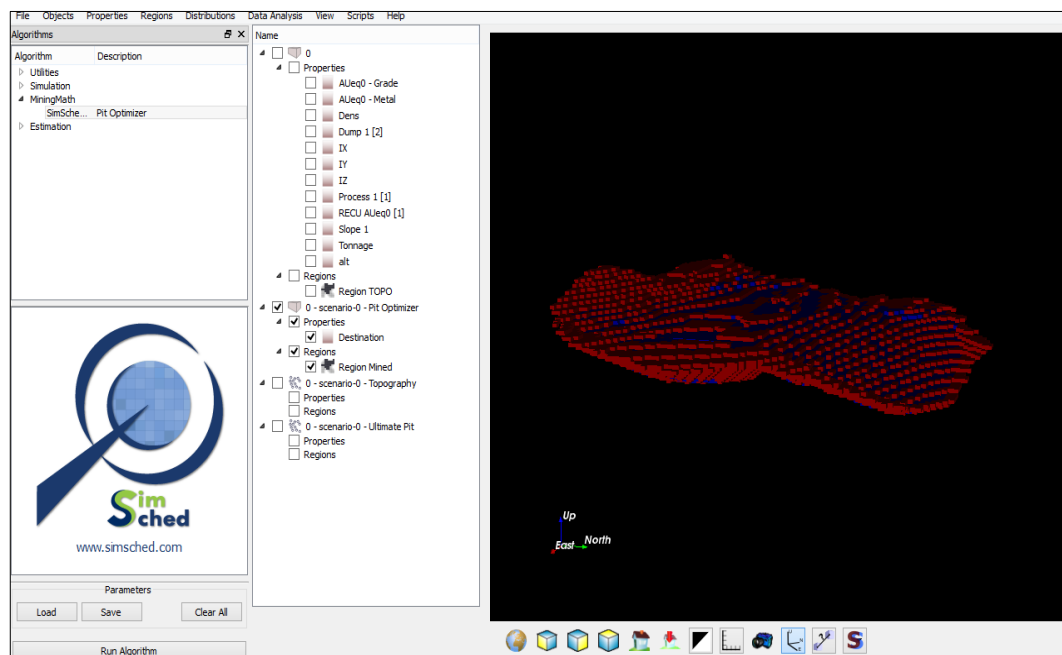
Name	Type	Recovery (AlUeq)	Economic value (\$)	Stockpile limit (t)
1 Process 1	process	RECU	Economic Value Process	<unlimited>
2 Dump 1	dump	0.00	Economic Value Waste	<none>
- General constraints:** A table with columns: Period ranges (From, To), Production limits (t) (Process 1, Dump 1, Total), and Surface mining limits (Force mining, Restrict mining).

Period ranges		Production limits (t)			Surface mining limits	
From	To	Process 1	Dump 1	Total	Force mining	Restrict mining
1	1	<unlimited>	<unlimited>	<unlimited>	<none>	<none>

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a las expresiones mencionadas anteriormente, se aplican los parámetros económicos, para la evaluación económica de los escenarios de estudio (figura 16), obteniendo los resultados de diseño en la figura 17.

Figura 17
Resultado económico por escenario programa Simched PO



Fuente: Elaboración propia.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Alteración

La alteración hidrotermal de la roca ocurre cuando fluidos o gases magmáticos suben a altas temperaturas a través de fracturas o zonas de falla. Esto tiene un impacto en los rellenos de las zonas de falla y sus cajas, lo que provoca reemplazamientos y rellenos que alteran las condiciones del macizo rocoso en el que se encuentran. Las características del macizo rocoso y las zonas de falla se mejoran con cambios como la silicificación y un menor grado de calcificación. Debido a la presencia de cloritas en las paredes fracturadas, alteraciones como la propilitización disminuyen las condiciones. La sericitización y argilitización son alteraciones menos favorables para los macizos rocosos (SNMPE, 2014).

2.3.2. *Altura de banco*

Corresponde a la altura del talud de un banco, que generalmente se determina mediante consideraciones operacionales más no geotécnicas. Recalde (2006) establece que las alturas de 10 m permiten aprovechar ventajas como el mayor control sobre fragmentación, rapidez en la ejecución de rampas entre bancos, menores niveles de vibración y mejores condiciones para restauración y tratamiento de taludes finales (Mendoza, 2016).

2.3.3. Ancho de berma (W)

Es la distancia entre el tobillo del banco y la cresta inferior, que está determinada por el volumen de derrame causado por las inestabilidades. Una vez considerado los parámetros de diseño, se evalúa la probabilidad de cumplir el ancho de banco del diseño. Incluso con un buen control de voladuras y excavaciones, la experiencia demuestra que en un ancho de banco específico, rara vez se puede lograr con el 100 % de fiabilidad (Mendoza, 2016). El ancho de berma que se puede alcanzar en realidad, se controla a través del perfilado que se pueda producir a lo largo de la cresta a medida que se excava el banco (Gerscovich, 2013).

Para determinar el pre dimensionamiento del ancho mínimo de la banqueta se utiliza la fórmula de Ritchie, para definir el ancho en función de la altura de banco [5].

$$W = 0,2 H + 4,5 \quad [5]$$

Donde:

- W es el ancho mínimo de banqueta de seguridad (m)
- H es la altura de banco (m)

2.3.4. Ancho de rampas

Aspectos operativos como el tamaño del equipo determinan este valor. El ancho de rampa debe de garantizar la libre transpirabilidad de los equipos. El artículo 288 del DS N° 055 – 2010 – EM exige construir rampas de anchos mínimos de 3 veces el ancho del vehículo más grande de la mina, para vías de doble sentido, mientras que, de 2 veces de ancho para vías de un solo sentido (MINEM, 2010).

2.3.5. Ángulo global

El parámetro de altura total es la altura total del tajo de diseño, medido desde el tobillo del banco más bajo hasta la cresta del banco más alto. Las alturas de los bancos se determinan por criterios operativos, que buscan maximizar la eficiencia de los equipos de excavación. Mientras que, el ángulo global es el ángulo formado por la horizontal y la línea imaginaria que une la toe del banco más inferior con la cresta del banco más superior (Mendoza, 2016).

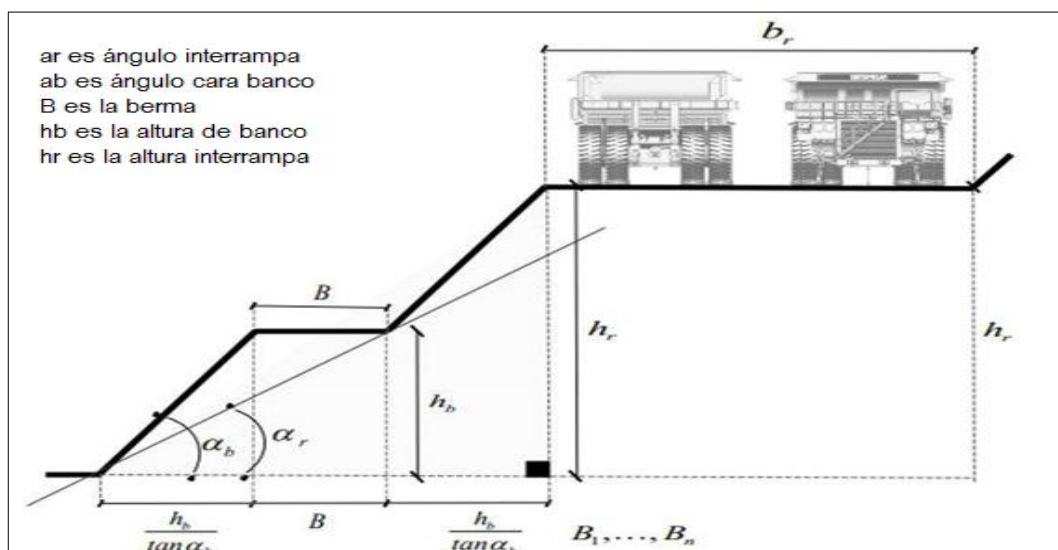
2.3.6. Ángulo interrampa (IRA)

La altura máxima entre rampas es la altura interrampa. Este valor se calcula utilizando las características geotécnicas del material. Mientras que, el ángulo interrampa es el ángulo que forma la horizontal y la línea que une todas los toes de los bancos, este valor no corresponde a la inclinación geotécnica del talud, sin embargo, es empleado para la planificación minera (Gerscovich, 2013).

2.3.7. Ángulo de banco (BFA)

El ángulo que forma la cara o talud del banco y la horizontal lo definen. La finalidad del ángulo de banco es reducir el potencial de deslizamiento del material en las operaciones de minado (Mendoza, 2016).

Figura 18
Parámetros diseño de tajo



Fuente: Dimitrakopoulos, 2011.

2.3.8. Modelo geológico

Para la realización de un adecuado modelamiento geológico se debe de considerar el tipo de yacimiento, tipo de roca, tipo de mineralogía, control estructural y alteraciones influyentes como la hidrotermal o supergénica. Para el caso del tajo Morrenas, el modelo geológico se basa principalmente en el grado y tipo de alteración hidrotermal. Esta alteración puede ser positiva para el grado de mineralización (silicificación) o negativa (argilización). También, es importante identificar las características geológicas, morfológicas y la génesis de la mineralización (OSINERGMIN, 2017, p .42).

2.3.9. Ley equivalente

La ley equivalente se determina mediante la expresión [6].

$$Ley Au Eq = Ley Au + \frac{Ley Ag \cdot (RAg \cdot (PAg - CvAg))}{RAu \cdot (PAu - CvAu)} \quad [6]$$

Donde:

- Ley Au Eq es la ley de oro equivalente en g/t.

- Ley Au es la ley de oro cruda en g/t.
- Ley Ag es la ley de plata cruda en g/t.
- RAg es la recuperación de la plata en %.
- PAg es el precio de la plata en USD/g.
- CvAg es el costo de venta de la plata en USD/g.
- RAu es la recuperación del oro en %.
- PAu es el precio del oro en USD/g.
- CvAu es el costo de venta del oro en USD/g.

2.3.10. Indicador económico de decisión (Cut Off)

En la evaluación económica de un yacimiento mineral el indicador para determinar el destino del bloque minado, de ser económico será enviado a planta, de lo contrario al depósito de desmonte. Este indicador para el presente trabajo se evalúa a base a la metodología del Cut Off., que determina la cantidad mínima que hace posible pagar los costes de su extracción, tratamiento y comercialización, permitiéndolo discernir entre mineral y desmonte.

2.3.11. Recursos mineros

La ubicación, cantidad, concentración, características geológicas y continuidad de los recursos son estimadas a través de evidencia geológica y se subdividen de acuerdo a la incertidumbre asociada que se tenga, en recursos medidos, indicados e inferidos (JORC, 2012). Para cuantificar la incertidumbre asociada a la información geológica se debe de aplicar la simulación condicional en la estimación de recursos, de esta manera se podrá cuantificar la certeza de cumplimiento y evaluar el riesgo.

2.3.12. Relación estéril mineral (REM)

Es la cantidad de desmonte que se necesita extraer para minar una tonelada de mineral, conocido como relación de desbroce. El indicador va incrementando conforme se profundiza la explotación minera (Prieto, 2019).

$$REM = \frac{E}{M} \quad [7]$$

Donde:

- E es el desmonte a remover (t)
- M es el mineral a explotar (t)

2.3.13. Reservas mineras

Figura 19
Clasificación de recursos y reservas



Fuente: JORC, 2012.

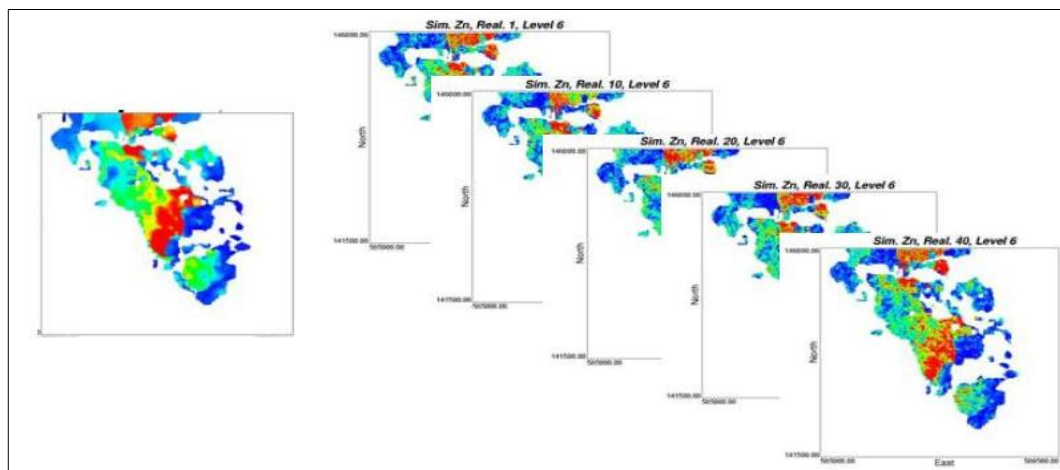
Se clasifican en probadas y probables, y representan un subconjunto del recurso mineral medido e indicado que se puede extraer de acuerdo a un plan minero técnico y económico sostenible. Las reservas mineras determinan la información QA/QC que permite la valoración final de un proyecto minero, definirán la vida y la rentabilidad del negocio. Por lo tanto, el cálculo de reservas debe realizarse bajo incertidumbre en la

información, considerando de esta forma un riesgo esperado (JORC, 2012).

2.3.14. Simulación condicional

Figura 20

Escenarios de simulación condicional gaussiana



Fuente: Cahuana, 2019.

Con el fin de replicar la variabilidad espacial de la variable regionalizada, se crea una variable ficticia que se interpreta como una realización específica de una función aleatoria. La intención es producir nuevas realizaciones, para lo cual se requiere una comprensión de la esperanza y el variograma, así como de la distribución espacial completa de la función aleatoria. Se crean varios escenarios para representar la incertidumbre relacionada con cada valor desconocido. La incertidumbre

en los valores desconocidos se puede caracterizar por la probabilidad de sobrepasar un umbral, por intervalos de confianza o por la dispersión y los valores extremos que puede tomar la variable (Cahuana, 2019).

2.3.15. Tasa interna de retorno (TIR)

La TIR es un método para calcular la rentabilidad de un proyecto, representando su media intrínseca, lo que permite que el presente valor neto sea cero, lo que significa que el proyecto no importa. La regla de decisión es aceptar proyectos cuya TIR sea mayor que el costo de capital u oportunidad con el mismo nivel de riesgo $TIR > r$. Donde r es la rentabilidad ofrecida en el mercado. La TIR es sensible al cambio de información económica, geología y operacional del proyecto.

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{I - E}{(1 + TIR)^n} = 0$$

[8]

Donde:

- TIR es la tasa de interna de retorno (%)
- VAN es el valor actual neto (USD)
- I_0 es la inversión inicial del proyecto (USD)

- n es el número de capitalizaciones al año
- i es la tasa de interés periódico (%)
- $I-E$ es el ingreso y egreso periódico (USD)

2.3.16. Valor actual neto (VAN)

El VAN mide el aporte económico de un proyecto minero a los inversores, dependiendo del flujo de caja y la tasa de descuento a través del tiempo. Si el $VAN > 0$, el proyecto es rentable, o de lo contrario es indiferente o no es factible invertir. El VAN es una de las variables afectadas directamente por la incertidumbre económica, geológica y operacional (Ordeñana, 2017). El VAN se determina por la ecuación [9].

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{I - E}{(1 + i)^n} \quad [9]$$

Donde:

- VAN es el valor actual neto (USD)
- I_0 es la inversión inicial del proyecto (USD)
- n es el número de capitalizaciones al año
- i es la tasa de interés periódico (%)
- $I-E$ es el ingreso y egreso periódico (USD)

2.3.17. Viabilidad técnica económica

La viabilidad técnica se refiere a las características tecnológicas y naturales del proyecto, evaluando si los recursos técnicos actuales son suficientes para llevar a cabo nuevos proyectos. La viabilidad económica, por otro lado, se relaciona con los recursos financieros disponibles para llevar a cabo un proyecto, determinando si el tiempo y el dinero están disponibles para desarrollar el proyecto.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

El tipo de investigación es de carácter aplicativo de enfoque cuantitativo, donde se pretende analizar los resultados obtenidos de los distintos escenarios de diseño del tajo Morrenas, al incorporar la incertidumbre geológica en el proceso de evaluación económica del proyecto. El nivel de investigación es de carácter predictivo y aplicativo, porque se trabajará con escenarios probables para determinar el diseño operativo esperado y predecir la factibilidad económica, considerando la incertidumbre de la información geológica. El diseño de investigación es de carácter correlacional, porque en función del diseño operativo esperado y la influencia de la incertidumbre en la información geológica, se determinará los cambios encontrados en el diseño operativo y factibilidad del tajo Morrenas, respecto a los estudios realizados por Pervol (2016). La investigación es de carácter no experimental, de diseño transversal correlacional, debido a que la investigación se basa principalmente en los resultados obtenidos del estudio de factibilidad del tajo Morrenas. Se

pretende evaluar las variables de decisión en términos determinísticos y estocásticos en referencia, con la finalidad de dar soporte y facilitar la toma de decisiones en base a las probabilidades de ocurrencia de factibilidad económica. La evaluación se realiza en base a escenarios obtenidos en los procesos de simulación geológica, aplicando algoritmos y programas especializados, para la obtención de resultados realistas.

3.2. Población y muestras

La población se enmarca en la estructura mineralizada del tajo Morrenas de la Unidad Minera Pucamarca del distrito de Palca, provincia y departamento de Tacna. La muestra se enfoca principalmente en los escenarios probables obtenidos de la simulación condicional, generados a partir de la información geológica del estudio de factibilidad del tajo Morrenas, realizados por Pervol (2016).

3.3. Equipos y herramientas

El presente estudio es de enfoque analítico de información, por lo tanto, es necesario contar con un computador para el procesamiento de la

información y acceso libre a los programas Isatis, SGeMS, SimSched PO, Recmin y Python. De no contar con los siguientes materiales, será necesario tener como equipo, una estación total, GPS diferencial y brújula de geólogo, y como herramientas, jalón o prisma, estacas de muestreo, bolsas herméticas y picota de geólogo; estos equipos y herramientas son mínimos para poder generar y obtener la información necesaria para el presente estudio.

- a) Planos topográficos, geológicos y geotécnicos
- b) Estudio de factibilidad del tajo Morrenas
- c) Reporte de indicadores operativos de la unidad minera
- d) Parámetros económicos, operativos, geotécnicos y metalúrgicos
- e) Informe de recursos y reservas

3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

El estudio actual se investigó utilizando técnicas de análisis descriptivo y aplicativo de las variables principales, observando y analizando documentos.

- a) Observación; este fue el principal método para la recopilación de la información, utilizado para generar la data geológica de estudio, enfocados en la variabilidad de las leyes de Au y Ag, de una observación de 35 puntos de sondeo, se obtuvieron 156 muestras de observación, esta recolección de información nos permitirá generar datos de campo para su posterior análisis, utilizando guías de campo.

- b) Análisis documental; los datos obtenidos en campo nos permiten generar escenarios de evaluación, que son utilizados para analizar e identificar las brechas de incertidumbre del yacimiento Morrenas, y determinar su impacto en el planeamiento de minas del tajo Morrenas, asociado al diseño esperado y determinista. La obtención de los datos nos permite verificar y validar los resultados del cumplimiento del plan de minado del tajo Morrenas, determinando su la certeza.

Los instrumentos de la presente investigación para las técnicas en campo, corresponden a las guías de observación, guías de análisis documental, validez y confiabilidad.

- a) Guías de observación; permite recopilar datos de campo sobre las muestras de sondeo. Los datos son analizados y procesados en el

programa Excel, ArcGIS, Isatis, Gems, Mining Math SPO y Python. Las guías de observación a través de un conjunto de indicadores orientan a la observación del fenómeno y permiten estudiar los aspectos relevantes.

- b) Guías de análisis documental; a partir de los datos de campo, informes de análisis estadístico y estructural, informes de estimación de recursos y reservas, se genera datos de escenarios de evaluación, estableciendo enfoques de estudios y aplicación de metodologías con la finalidad de analizar y validar los resultados obtenidos.
- c) Guías de confiabilidad y validez; la validez del proyecto de investigación se basa en garantizar la optimización de las herramientas utilizadas para la confiabilidad; los datos de campo y de gabinete se utilizaron para el análisis adecuado y el procesamiento posterior de los resultados del proyecto.

El procedimiento de las técnicas de recolección y análisis de datos se detallan a continuación.

- a) Etapa preliminar; se inicia con la estructuración del proceso de ejecución del informe de investigación mediante antecedentes y

fuentes bibliográficas, artículos, revistas, catálogos y trabajos técnicos sobre la incorporación de la incertidumbre geológica en el planeamiento de minado, posteriormente se procedió a programar los trabajos para la recolección de datos y generación de escenarios de evaluación.

- b) Etapa de campo; con los instrumentos para la toma de datos y generación de escenarios de evaluación, utilizando las técnicas de observación y los instrumentos elaborados como la guía de observación, para registrar la realidad del problema respecto a la certeza de la información geológica y su influencia en el planeamiento de minas, se levanta la información observada, para posteriormente analizar y procesar la etapa de gabinete.
- c) Etapa de gabinete; después de recopilar toda la información en el campo mediante el instrumento de guía de observación respecto a las variables independientes, dependientes y asociadas, para alimentar a la base de datos y procesarlos con el programa Excel y SPSS, sincerando los controles identificados en campo, con la información levantada se pretende evaluar la influencia de la incertidumbre en el planeamiento y diseño del tajo Morrenas, con la finalidad contrastar los resultados alcanzados, validando de esta forma la investigación.

Tabla 7*Instrumento de recolección de muestras*

Instrumento de Recolección - Muestras Tajo Morrenas (VI)							
Código	X	Y	Z	Zona Alteración	Densidad (g/t)	Au (g/t)	Ag (g/t)
1	414 711	8 029 894	4 390	Morrenas	2,14	0,16	1,06
2	414 716	8 029 965	4 391	Morrenas	2,14	0,23	1,08
3	414 721	8 030 035	4 399	Morrenas	2,14	0,73	2,31
4	414 725	8 030 106	4 376	Morrenas	2,14	0,91	2,47
5	414 730	8 030 176	4 356	Morrenas	2,14	0,62	1,92
6	414 735	8 030 247	4 340	Morrenas	2,14	0,17	0,70
7	414 777	8 029 819	4 394	Morrenas	2,14	0,38	1,46
8	414 782	8 029 890	4 387	Morrenas	2,14	0,46	2,37
9	414 786	8 029 960	4 394	Morrenas	2,14	0,42	2,36
10	414 791	8 030 031	4 394	Morrenas	2,14	0,84	3,71
11	414 796	8 030 101	4 372	Morrenas	2,14	0,85	7,19
12	414 801	8 030 172	4 353	Morrenas	2,14	1,30	10,02
13	414 805	8 030 242	4 330	Morrenas	2,14	0,75	5,56
14	414 843	8 029 744	4 396	Morrenas	2,14	0,33	0,88
15	414 848	8 029 814	4 383	Morrenas	2,14	0,45	1,72
16	414 852	8 029 885	4 383	Morrenas	2,14	0,67	3,34
17	414 857	8 029 955	4 390	Morrenas	2,14	0,85	4,69
18	414 862	8 030 026	4 391	Morrenas	2,14	0,70	7,47
19	414 866	8 030 096	4 369	Morrenas	2,14	0,64	14,35
20	414 871	8 030 167	4 346	Morrenas	2,14	1,03	28,37
21	414 876	8 030 238	4 323	Morrenas	2,14	0,46	6,43
22	414 881	8 030 308	4 312	Morrenas	2,14	0,30	1,64
23	414 913	8 029 739	4 386	Morrenas	2,14	0,36	0,77
24	414 918	8 029 810	4 375	Morrenas	2,14	0,33	0,81
25	414 923	8 029 880	4 379	Morrenas	2,14	0,39	1,63
26	414 928	8 029 951	4 383	Morrenas	2,14	0,80	4,34
27	414 932	8 030 021	4 385	Morrenas	2,14	1,03	25,09
28	414 937	8 030 092	4 358	Morrenas	2,14	0,85	21,95
29	414 942	8 030 162	4 341	Morrenas	2,14	0,74	21,50
30	414 984	8 029 734	4 379	Morrenas	2,14	0,44	0,96
31	414 989	8 029 805	4 372	Morrenas	2,14	0,52	0,93
32	414 993	8 029 875	4 372	Morrenas	2,14	0,47	1,45
33	414 998	8 029 946	4 376	Morrenas	2,14	0,54	2,13
34	415 055	8 029 730	4 375	Morrenas	2,14	0,46	1,07
35	415 067	8 029 791	4 377	Morrenas	2,14	0,52	0,84

Fuente: Elaboración propia.

Para la presente investigación, la recolección de datos se fundamenta en la observación de 35 puntos de sondeo (tabla 7), donde a partir de esta información se obtienen 156 muestras de análisis. Con la observación levantada, se procede a generar los escenarios de evaluación del planeamiento de minado del diseño de tajo Morrenas respecto a la incertidumbre geológica.

3.5. Técnicas para el procesamiento de datos

De acuerdo a los datos registrados en el estudio, se procede a establecer las técnicas de procesamiento y análisis de datos correspondientes a la influencia de la incertidumbre geológica en el planeamiento minero aplicado al diseño del tajo Morrenas, el tratamiento de los datos se divide en la obtención del diseño esperado del tajo Morrenas, análisis de influencia de la incertidumbre geológica, evaluación económica de los escenarios y contraste de hipótesis.

- a) Para el diseño operativo esperado, según las configuraciones técnicas del diseño de tajo abierto Morrenas, se utilizará los programas SGeMS, Isatis, SimSched PO y Recmin, correspondiente a la generación de escenarios probables y diseño de mina, para obtener la envolvente operativa esperada (VI 1).

- b) Para el análisis de la influencia de la incertidumbre en la información geológica, se utilizará los programas Python y Excel, correspondiente a su incorporación para asegurar el cumplimiento del diseño operativo esperado (VI 2).
- c) Para la evaluación económica de la explotación del tajo Morrenas, se realizará la evaluación económica de los escenarios propuestos, desde el enfoque determinístico y estocástico.
- d) El análisis de resultados y contraste de hipótesis, se realizará con el programa SPSS; se aplicará la prueba t Student para el contraste de hipótesis, para determinar si se aceptará o rechazará la hipótesis alternativa de investigación, además se analizará los resultados obtenidos respecto a los antecedentes del estudio.

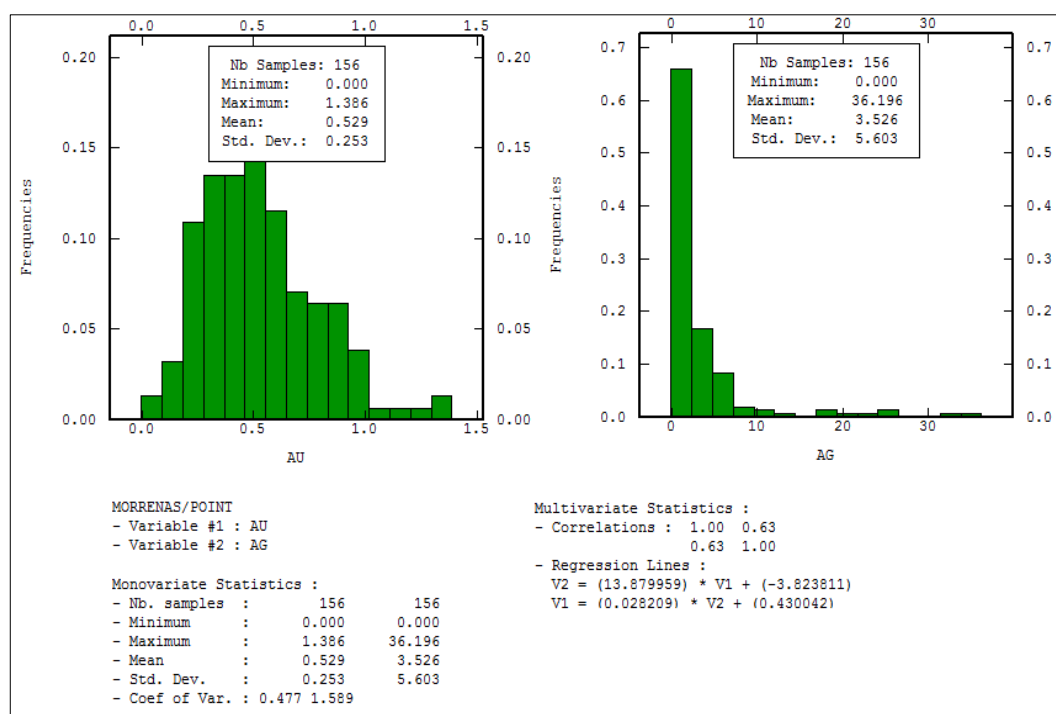
CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la investigación

Figura 21

Histograma de las leyes de Au y Ag crudas

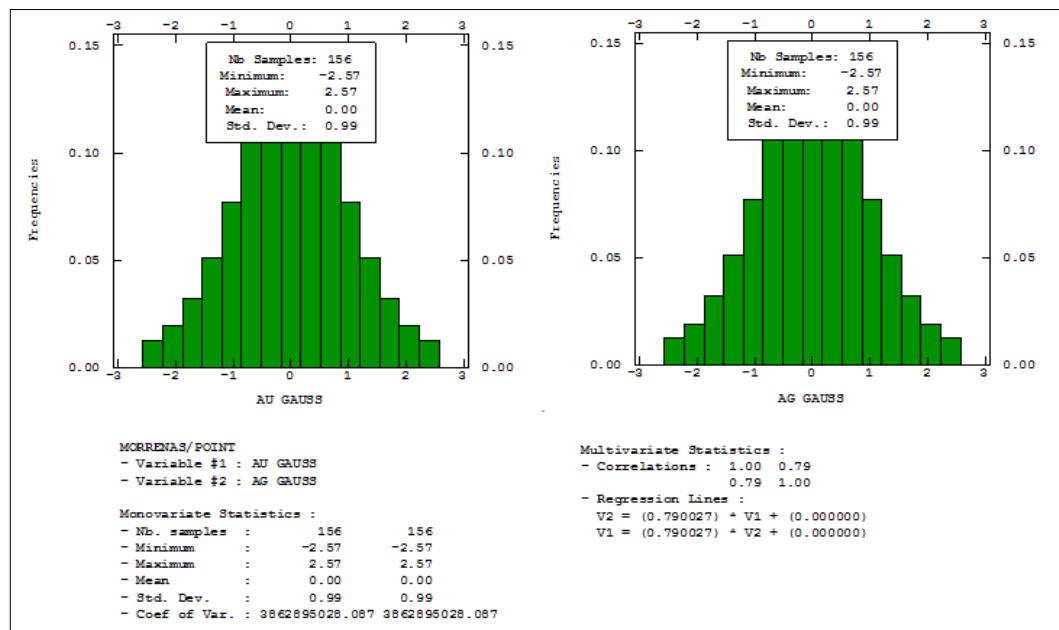


Fuente: Elaboración propia.

Para la evaluación de escenarios, se procede a realizar la estimación base aplicando el método de Kriging Ordinario (KO) para la

estimación de recursos del yacimiento Morrenas. En la figura 21 se observa el análisis descriptivo de las variables Au (g/t) y Ag (g/t). Como se observa las variables de ley tienden a una distribución lognormal, por lo tanto, se realiza la transformación Gaussiana de las datos crudos para obtener distribuciones normalizadas, con finalidad de aplicar la simulación condicional, como resultado se obtiene los parámetros de la figura 22.

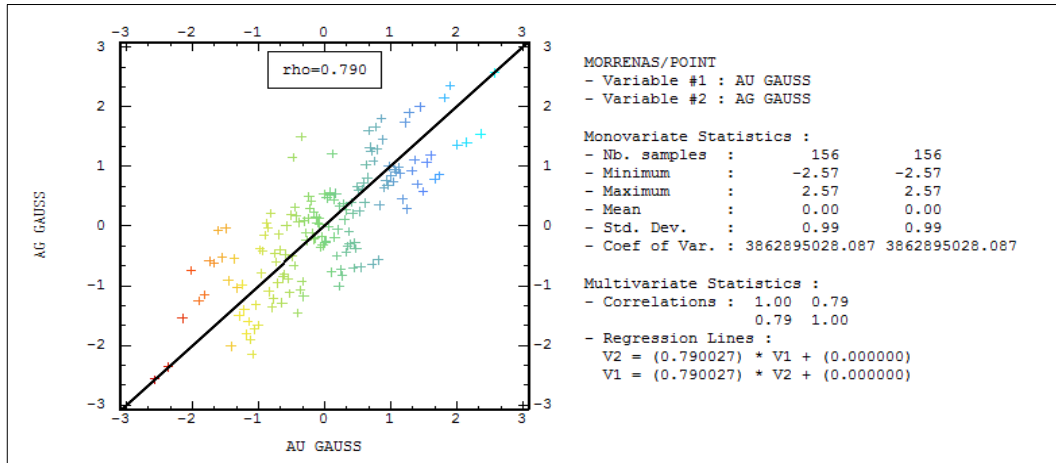
Figura 22
Histograma de leyes de Au y Ag con transformación Gaussiana



Fuente: Elaboración propia.

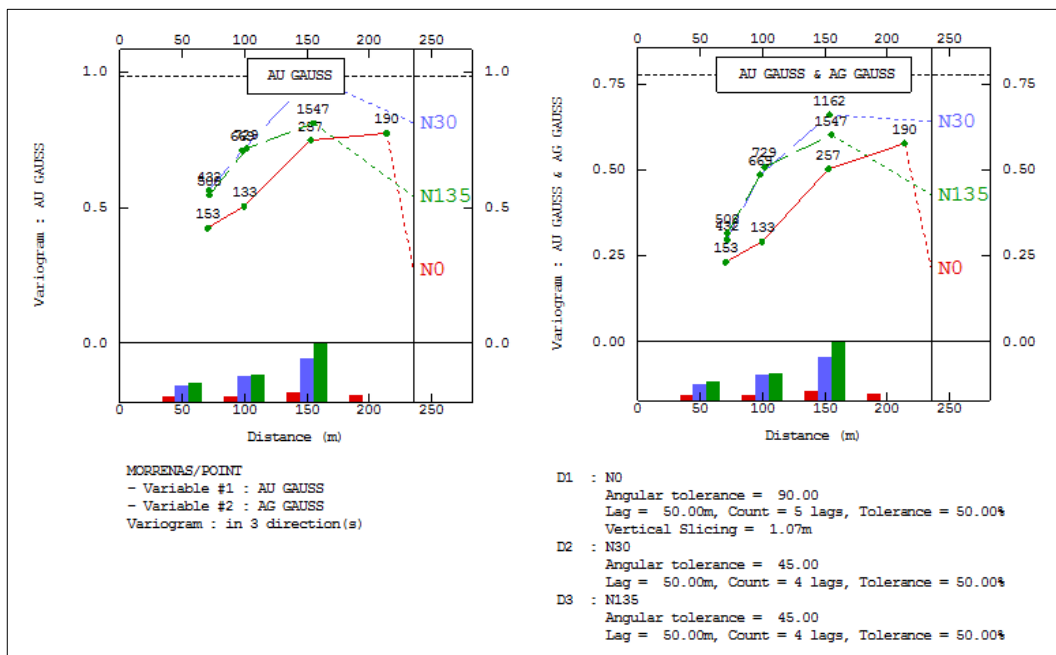
Se aplica el diagrama de Scatter para determinar si las variables presentan correlación (figura 23). Como presenta correlación se procede a realizar el análisis estructural de ambas variables (figura 24).

Figura 23
Correlación de variable Ley Au y Ley Ag



Fuente: Elaboración propia.

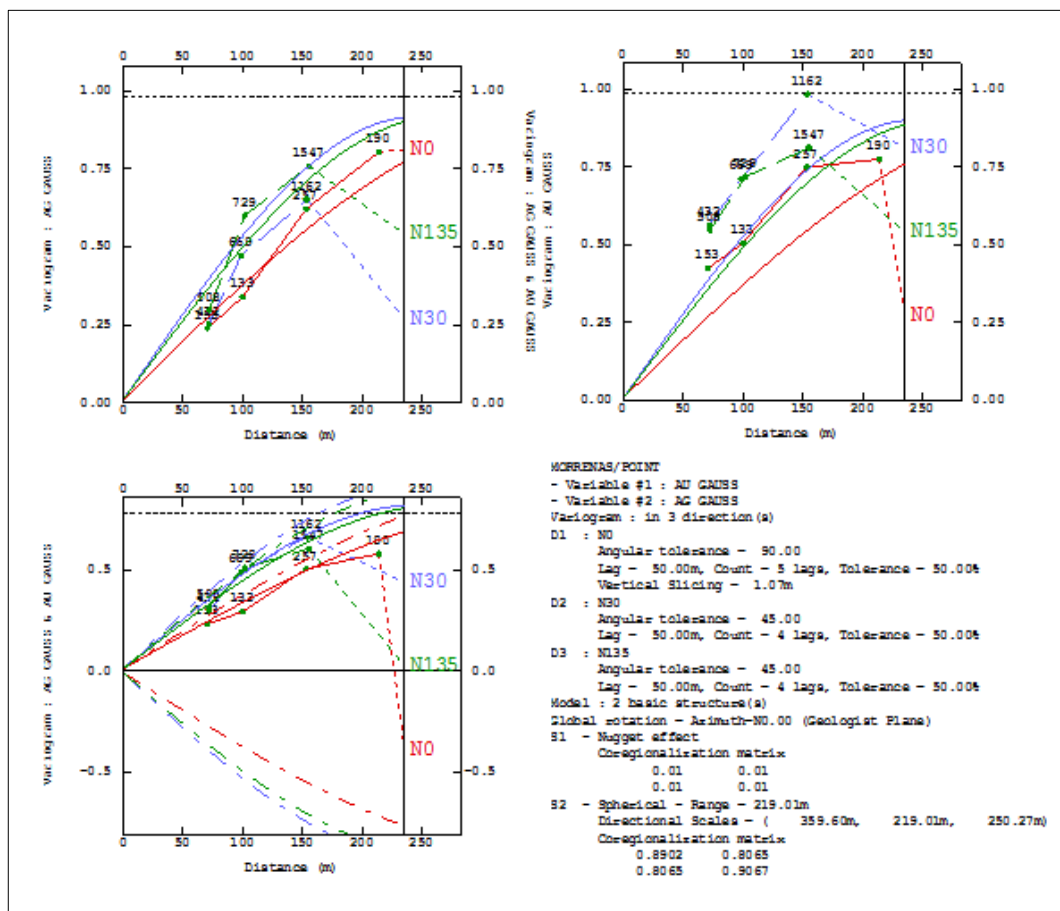
Figura 24
Análisis estructural de la variable Ley Au y Ley Ag



Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber realizado el análisis estructural de las variables, se realiza el modelamiento estructural de la variabilidad de leyes, como se observa en la figura 25, se modela en 3 direcciones según el comportamiento zonal, ajustándose al modelo esférico con un alcance de 250 m en promedio.

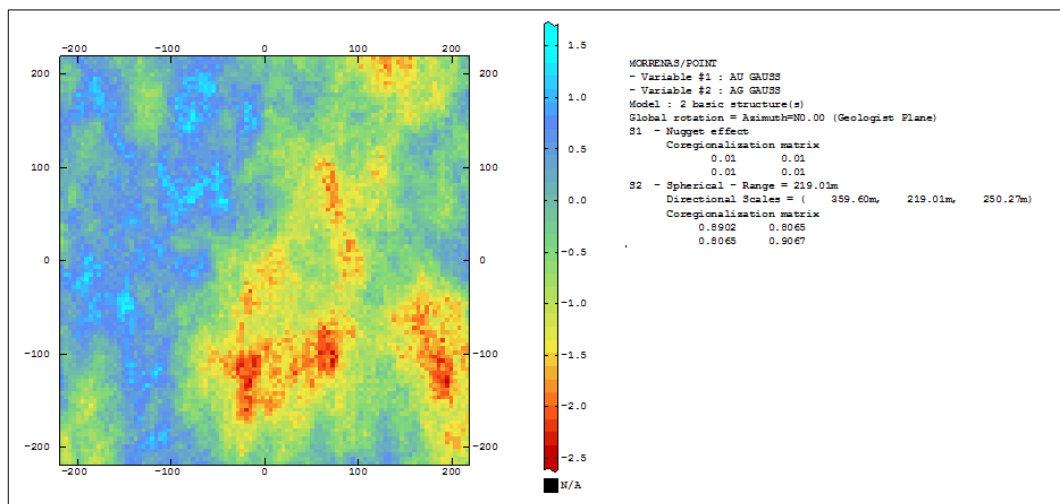
Figura 25
Modelamiento estructural de la variable Ley Au y Ley Ag



Fuente: Elaboración propia.

A partir del modelamiento estructural se realiza la estimación de recursos del tajo Morrenas (figura 26), sin embargo, la información obtenida se encuentra ajustada a la curva Gaussiana, por lo tanto, para poder ser trabajada, se realiza la transformación de los resultados de acuerdo a los parámetros de la información cruda.

Figura 26
Estimación de las variables Ley Au y Ley Ag



Fuente: Elaboración propia.

Como resultado del análisis geoestadístico y simulación condicional realizado a la información levantada de campo por medio de la observación, se genera la información de 30 posibles casos del comportamiento geológico en base leyes del tajo Morrenas.

Tabla 8*Data de 30 casos de comportamiento geológico alteración Morrenas*

Modelo	Au Eq (g/t)
	0,44
	0,44
	0,44
	0,44
	0,43
	0,43
	0,43
	0,44
	0,43
	0,43
	0,44
	0,43
	0,44
	0,45
Alteración Morrenas Esperado	0,44
	0,43
	0,45
	0,42
	0,45
	0,45
	0,43
	0,42
	0,45
	0,46
	0,43
	0,43
	0,44
	0,42
	0,44
	0,44
Alteración Morrenas Determinista	0,44

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7, se observa la información obtenida en base a la variable Ley Au Eq (g/t), para calcular esta variable se realizó mediante la expresión [9], para cada caso probable del comportamiento geológico de la alteración Morrenas, este cálculo facilitará el proceso de evaluación económica de los siguientes escenarios, obteniendo un factor de ajuste de 0,00059, considerando los parámetros de ingreso de la tabla 9.

Tabla 9
Parámetros económicos para calcular Ley Au Eq

Parámetros Económicos	Au	Ag
Recuperación (%)	52	8
Precio del metal (USD/g)	57,9	0,7
Costo venta (USD/g)	0,48	0,48

Fuente: Elaboración propia.

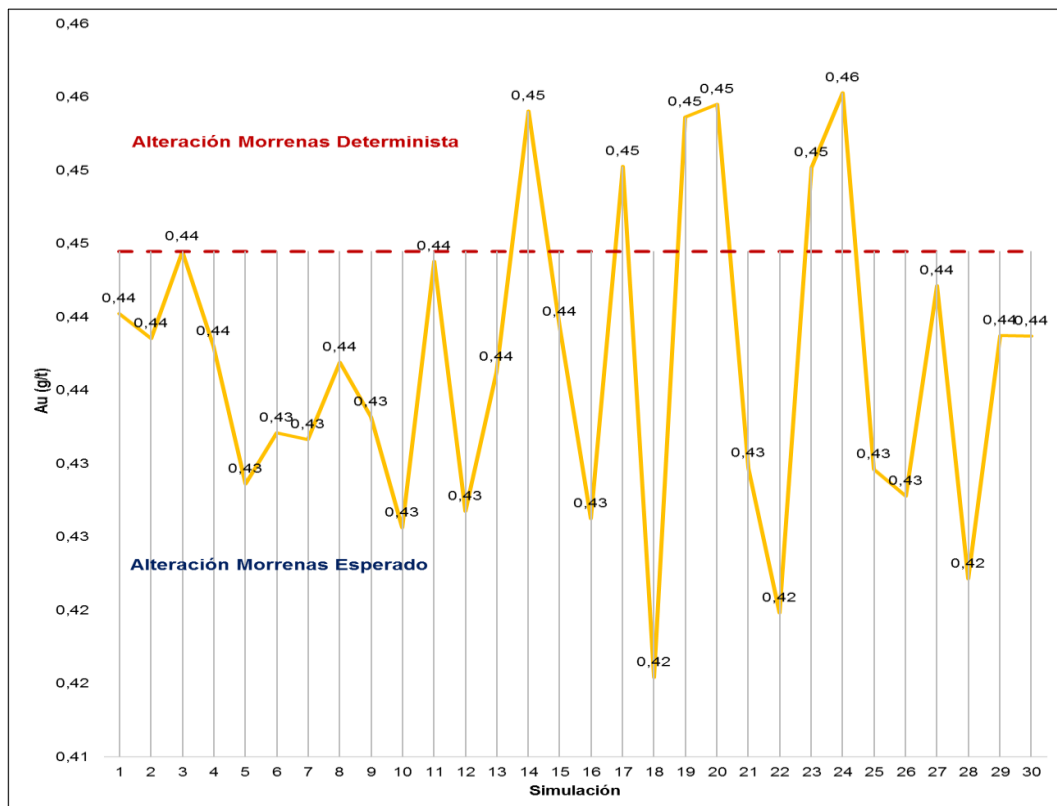
Tabla 10
Recuperación del Au en base a intervalo de leyes

Intervalo de leyes Au (g/t)	Recuperación (%)
0,07 - 0,1	50
0,1 - 0,3	51,9
0,3 - 0,5	52,1
0,5 – 1	55,1
> 1	67,7

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información obtenida en la tabla 10, se puede observar la distribución de la información en la figura 27, donde se observa que las leyes simuladas del contacto de la alteración Morrenas tienden a ser sobreestimados respecto al resultado obtenido por el método KO, solo en 6 casos se encuentran por encima del caso determinista. Esta información obtenida, nos permite generar los escenarios de evaluación económica del tajo Morrenas.

Figura 27
Casos del comportamiento geológico contacto alteración Morrenas



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11*Parámetros económicos para la evaluación de escenarios de estudio*

Parámetros Económicos	Au
Precio del metal (USD/g)	57,9
Costo venta (USD/g)	0,48
Costo de minado mineral (USD/t)	0,897
Costo de minado desmonte (USD/t)	1,38
Costo de procesamiento mineral (USD/t)	2,82

Fuente: Elaboración propia.

Se realiza la evaluación económica de los escenarios del tajo Morrenas considerando los parámetros de la tabla 11 en el programa Simsched PO, obteniendo los resultados de la tabla 12.

Tabla 12*Resultados de la evaluación económica por escenarios*

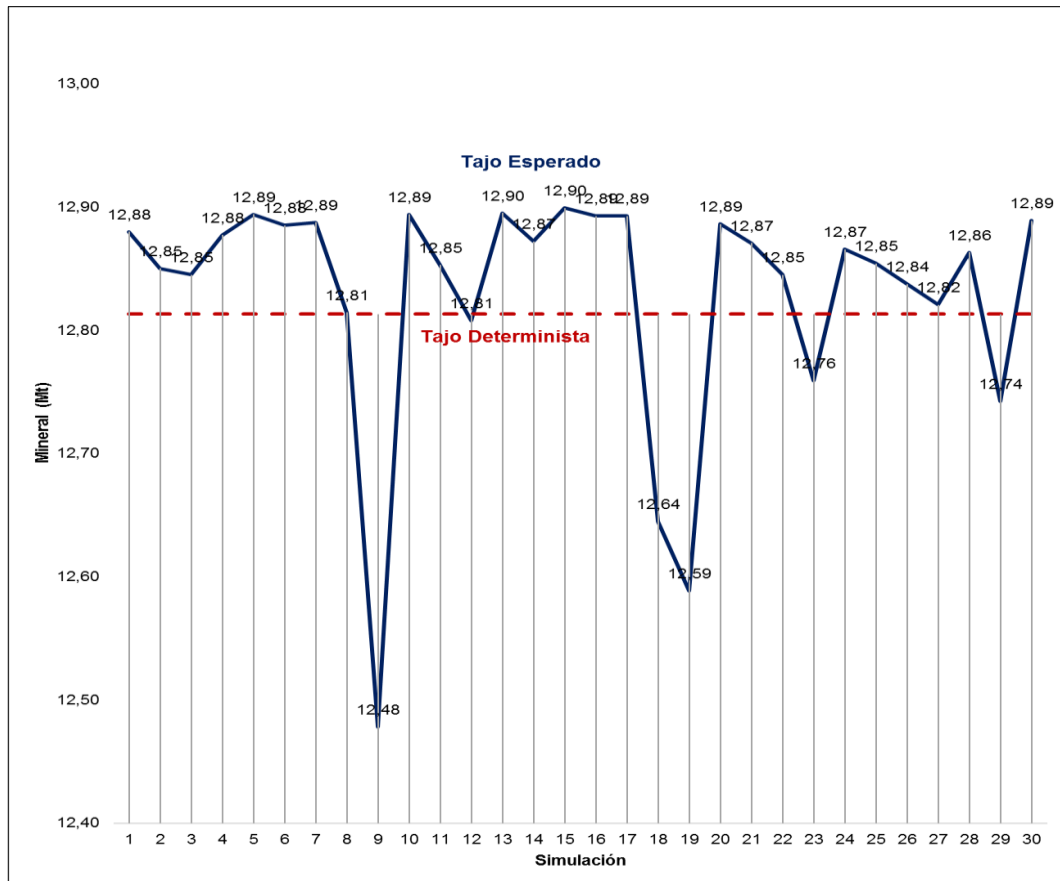
Diseño	Mineral (Mt)	Au (g/t)	Au (koz)	VAN (MUSD)	Desmonte (Mt)	REM
	12,88	0,48	118,15	126,24	8,24	0,64
	12,85	0,51	124,08	134,96	8,33	0,65
	12,85	0,49	119,96	128,72	8,06	0,63
	12,88	0,49	119,88	128,48	8,31	0,65
	12,89	0,49	119,86	128,72	8,05	0,62
	12,88	0,48	117,01	124,32	8,23	0,64
Tajo Esperado	12,89	0,48	117,94	125,92	8,18	0,63
	12,81	0,48	117,37	125,52	8,33	0,65
	12,48	0,5	119,15	128,80	8,02	0,64
	12,89	0,49	120,20	129,12	8,44	0,65
	12,85	0,47	115,83	123,36	7,93	0,62
	12,81	0,5	121,64	130,56	8,43	0,66
	12,90	0,48	116,82	123,44	8,37	0,65

12,87	0,49	119,37	127,68	8,16	0,63	
12,90	0,51	124,28	134,96	8,59	0,67	
12,89	0,47	116,12	123,20	8,30	0,64	
12,89	0,47	116,12	123,20	8,30	0,64	
12,64	0,51	123,34	134,00	7,90	0,62	
12,59	0,47	112,68	119,44	7,68	0,61	
12,89	0,49	119,90	128,64	8,19	0,64	
12,87	0,51	124,58	135,28	8,28	0,64	
12,85	0,48	116,97	125,04	7,83	0,61	
12,76	0,47	114,11	120,72	8,30	0,65	
12,87	0,50	123,85	133,92	8,05	0,63	
12,85	0,51	124,80	135,52	8,45	0,66	
12,84	0,48	117,58	125,20	7,99	0,62	
12,82	0,48	116,56	124,24	8,18	0,64	
12,86	0,49	120,89	130,16	8,15	0,63	
12,74	0,47	115,10	122,16	7,77	0,61	
12,89	0,49	121,60	131,20	8,23	0,64	
Tajo Determinista	12,81	0,50	121,16	131,44	7,89	0,62

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información obtenida en la tabla 12, se puede observar la distribución de la información en la figura 24, donde se observa que el tonelaje de mineral del tajo Morrenas tienden a ser subestimado respecto al resultado obtenido por el método KO, solo en 4 casos se encuentran por debajo del caso determinista.

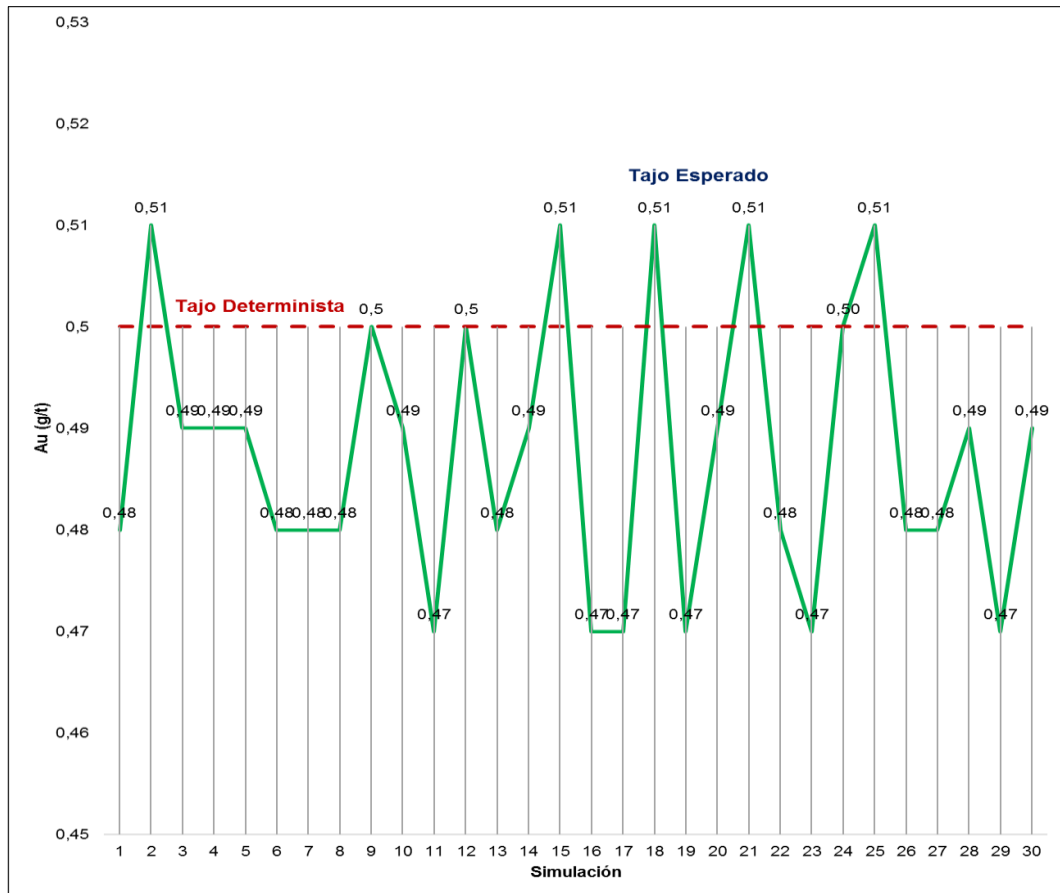
Figura 28
Resultado variable tonelaje de mineral



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información obtenida en la tabla 12, se puede observar la distribución de la información en la figura 29, donde se observa que la ley de oro del tajo Morrenas tienden a ser sobreestimado respecto al resultado obtenido por el método KO, solo en 5 casos se encuentran por encima del caso determinista.

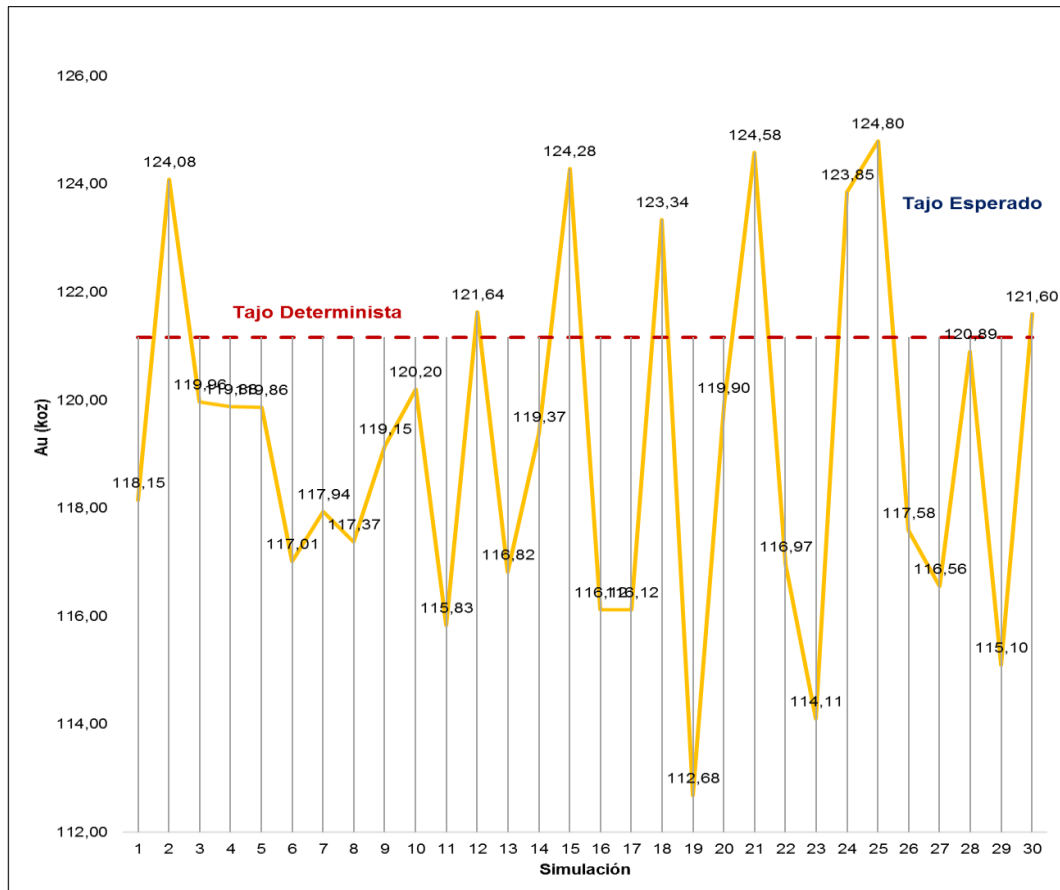
Figura 29
Resultado variable ley de oro



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información obtenida en la tabla 12, se puede observar la distribución de la información en la figura 30, donde se observa que las onzas de oro del tajo Morrenas tienden a ser sobreestimado respecto al resultado obtenido por el método KO, solo en 8 casos se encuentran por encima del caso determinista.

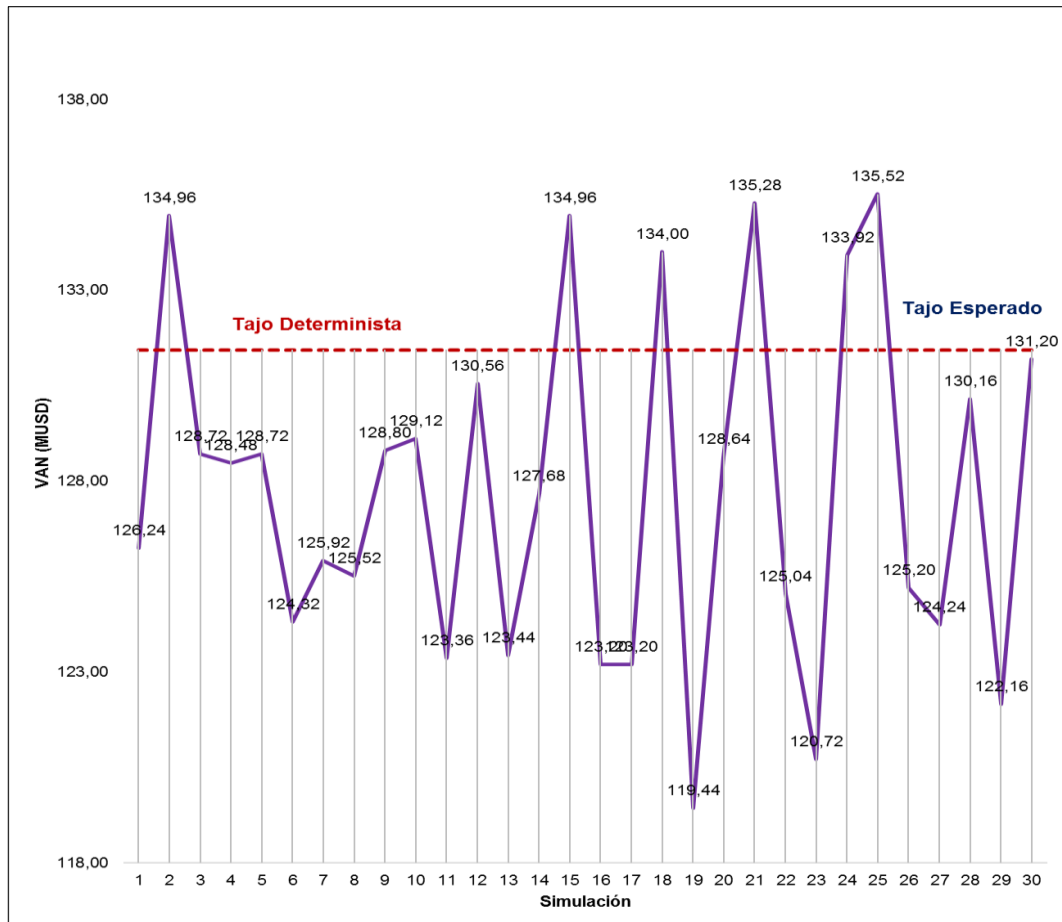
Figura 30
Resultado variable onzas de oro



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información obtenida en la tabla 12, se puede observar la distribución de la información en la figura 31, donde se observa que la variable VAN del tajo Morrenas tienden a ser sobreestimado respecto al resultado obtenido por el método KO, solo en 6 casos se encuentran por encima del caso determinista.

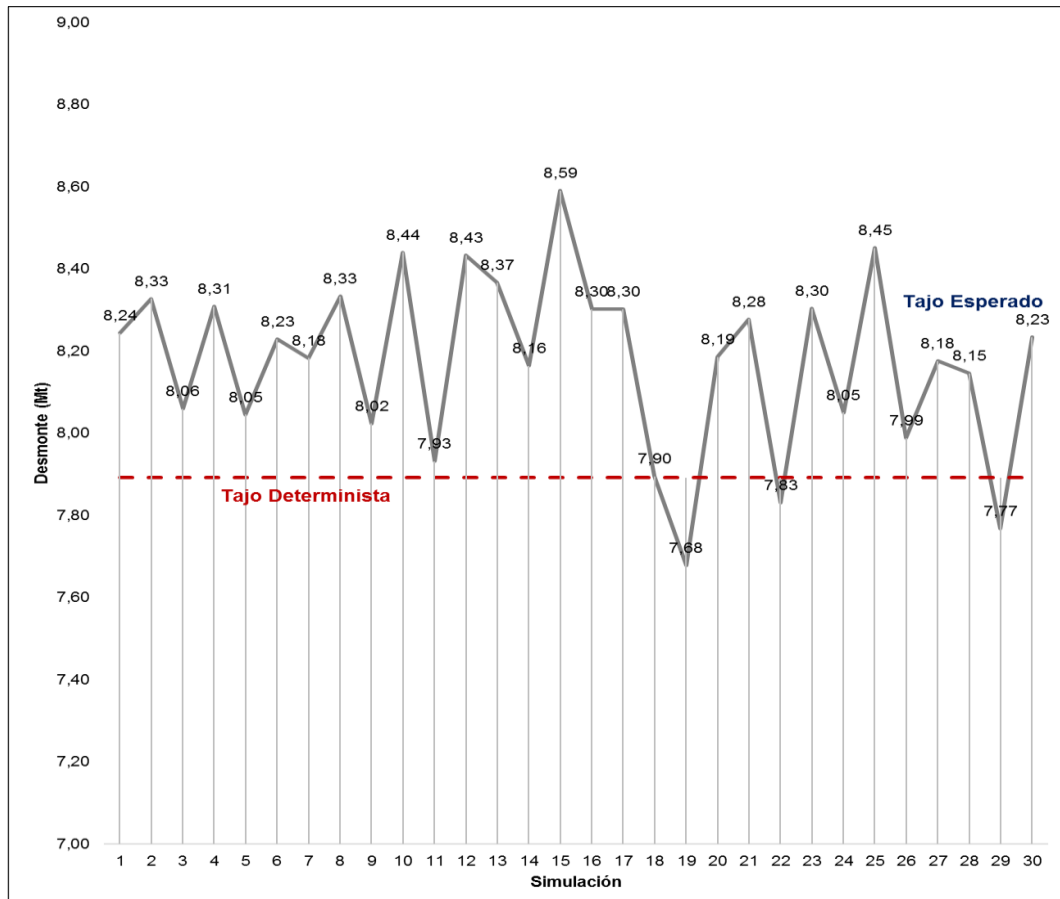
Figura 31
Resultado variable VAN



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información obtenida en la tabla 12, se puede observar la distribución de la información en la figura 32, donde se observa que la variable tonelaje de desmonte del tajo Morrenas tienden a ser subestimado respecto al resultado obtenido por el método KO, solo en 3 casos se encuentran por debajo del caso determinista.

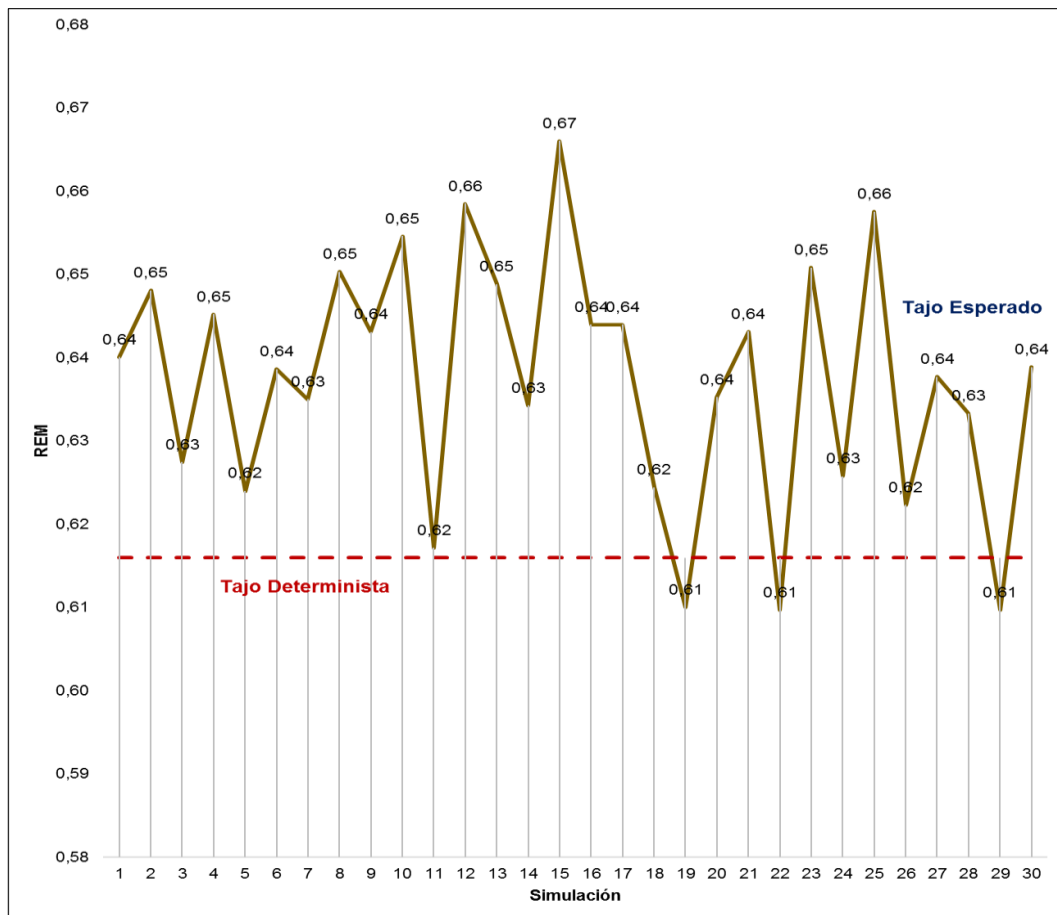
Figura 32
Resultado variable tonelaje de desmorte



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información obtenida en la tabla 12, se puede observar la distribución de la información en la figura 33, donde se observa que la variable REM del tajo Morrenas tienden a ser subestimado respecto al resultado obtenido por el método KO, solo en 3 casos se encuentran por debajo del caso determinista.

Figura 33
Resultado variable REM



Fuente: Elaboración propia.

Como se observan en la tabla 12 y en las figuras respectivas, los datos obtenidos del análisis económico de los escenarios del tajo Morrenas del programa Simched PO correspondiente a los 30 escenarios de estudio.

Tabla 13
Resultados de información de análisis por escenarios

Diseño	Contacto Au (g/t)	Mineral (Mt)	Au (g/t)	Au (koz)	VAN (MUSD)	Desmonte (Mt)	REM
	0,44	12,88	0,48	118,15	126,24	8,24	0,64
	0,44	12,85	0,51	124,08	134,96	8,33	0,65
	0,44	12,85	0,49	119,96	128,72	8,06	0,63
	0,44	12,88	0,49	119,88	128,48	8,31	0,65
	0,43	12,89	0,49	119,86	128,72	8,05	0,62
	0,43	12,88	0,48	117,01	124,32	8,23	0,64
	0,43	12,89	0,48	117,94	125,92	8,18	0,63
	0,44	12,81	0,48	117,37	125,52	8,33	0,65
	0,43	12,48	0,5	119,15	128,80	8,02	0,64
	0,43	12,89	0,49	120,20	129,12	8,44	0,65
	0,44	12,85	0,47	115,83	123,36	7,93	0,62
	0,43	12,81	0,5	121,64	130,56	8,43	0,66
	0,44	12,90	0,48	116,82	123,44	8,37	0,65
	0,45	12,87	0,49	119,37	127,68	8,16	0,63
Tajo Esperado	0,44	12,90	0,51	124,28	134,96	8,59	0,67
	0,43	12,89	0,47	116,12	123,20	8,30	0,64
	0,45	12,89	0,47	116,12	123,20	8,30	0,64
	0,42	12,64	0,51	123,34	134,00	7,90	0,62
	0,45	12,59	0,47	112,68	119,44	7,68	0,61
	0,45	12,89	0,49	119,90	128,64	8,19	0,64
	0,43	12,87	0,51	124,58	135,28	8,28	0,64
	0,42	12,85	0,48	116,97	125,04	7,83	0,61
	0,45	12,76	0,47	114,11	120,72	8,30	0,65
	0,46	12,87	0,50	123,85	133,92	8,05	0,63
	0,43	12,85	0,51	124,80	135,52	8,45	0,66
	0,43	12,84	0,48	117,58	125,20	7,99	0,62
	0,44	12,82	0,48	116,56	124,24	8,18	0,64
	0,42	12,86	0,49	120,89	130,16	8,15	0,63
	0,44	12,74	0,47	115,10	122,16	7,77	0,61
	0,44	12,89	0,49	121,60	131,20	8,23	0,64
Tajo Determinista	0,44	12,81	0,50	121,16	131,44	7,89	0,62

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la validación de las hipótesis de la presente investigación se trata con la información obtenida en el ítem recolección y procesamiento de datos observadas en la tabla 13, donde las principales variables de análisis son contacto geológico, tonelaje de mineral, ley de Au, onzas de Au, VAN, tonelaje de desmonte y REM del tajo Morrenas.

a) Prueba de normalidad de datos; en la tabla 14, se observa los resultados del análisis de normalidad de las variables; de acuerdo a la evaluación del P-valor ($\alpha > 0,05$), se acepta H_0 para distribución normal; se considera la prueba de Shapiro-Wilk, por tener muestras menores a 50.

Tabla 14
Prueba de normalidad de variables

Prueba de normalidad	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Contacto Au (g/t)	0,911	30	0,016
Mineral (Mt)	0,671	30	0,000
Au (g/t)	0,890	30	0,005
Au (koz)	0,962	30	0,348
VAN (MUSD)	0,952	30	0,188
Desmonte (Mt)	0,972	30	0,588
REM	0,951	30	0,176

Fuente: Elaboración propia.

Se determina que las variables tonelaje de mineral y ley de Au presentan presencia de valores erráticos considerables, por lo tanto, al realizar la depuración de los escenarios 9, 18, 19, 23 y 29 se logra obtener que las variables contacto geológico, tonelaje de mineral, ley de Au, onzas de Au, VAN, tonelaje de desmonte y REM del tajo Morrenas, presentan una distribución normalizada (tabla 15).

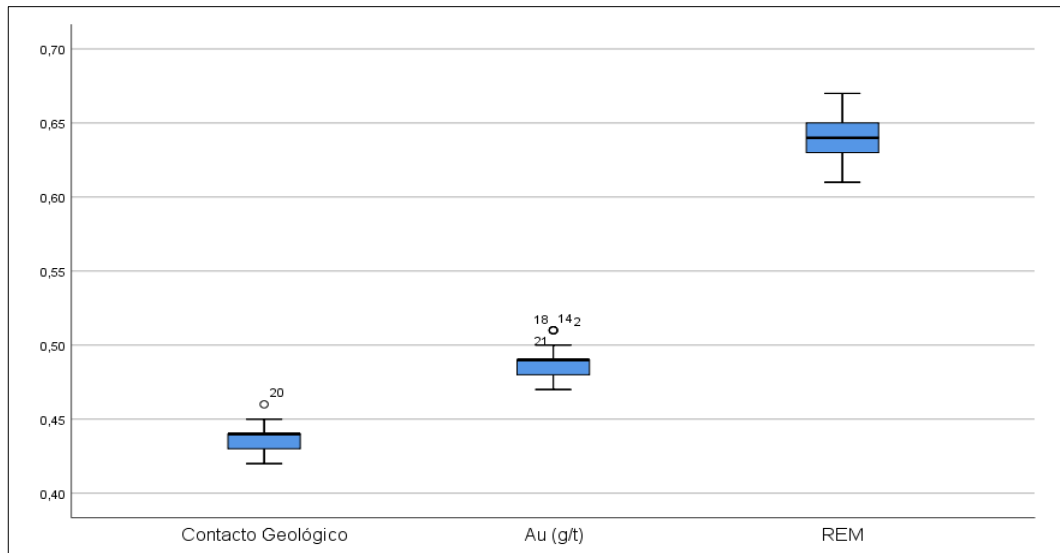
Tabla 15
Prueba de normalidad de variables modificadas

Prueba de normalidad	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Contacto Au (g/t)	0,900	25	0,018
Mineral (Mt)	0,890	25	0,011
Au (g/t)	0,889	25	0,011
Au (koz)	0,910	25	0,030
VAN (MUSD)	0,906	25	0,025
Desmonte (Mt)	0,986	25	0,976
REM	0,961	25	0,432

Fuente: Elaboración propia.

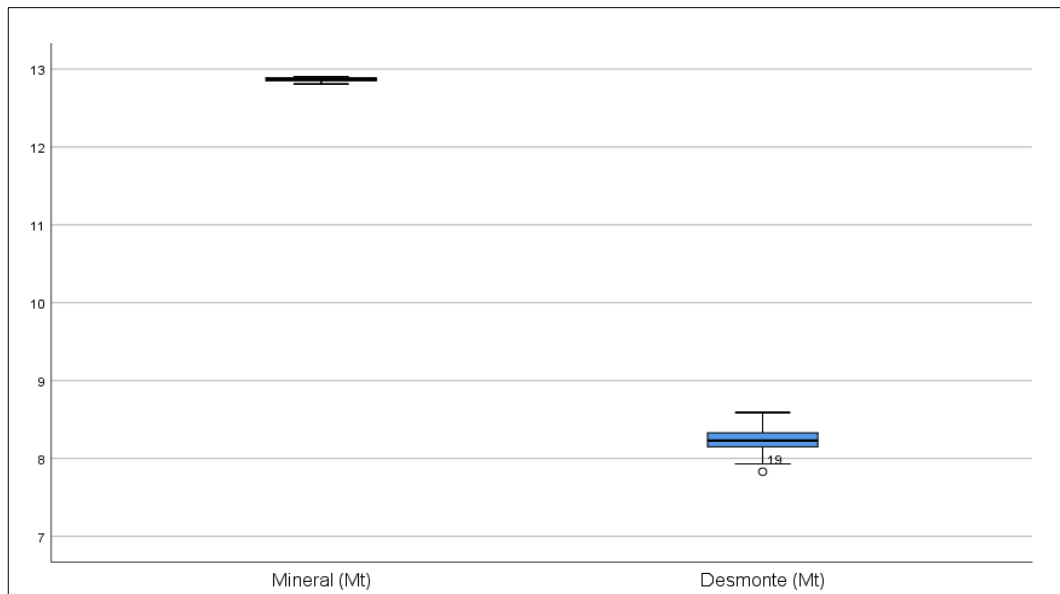
Como se observa en la figura 34 y 35, las variables contacto geológico, ley Au y REM, tonelaje de mineral y desmonte, presentan una distribución normal, sin embargo, aún se observan sesgos en la media, pero son aceptables de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de Shapiro-Wilk.

Figura 34
Caja bigotes variable contacto, ley Au y REM



Fuente: Elaboración propia.

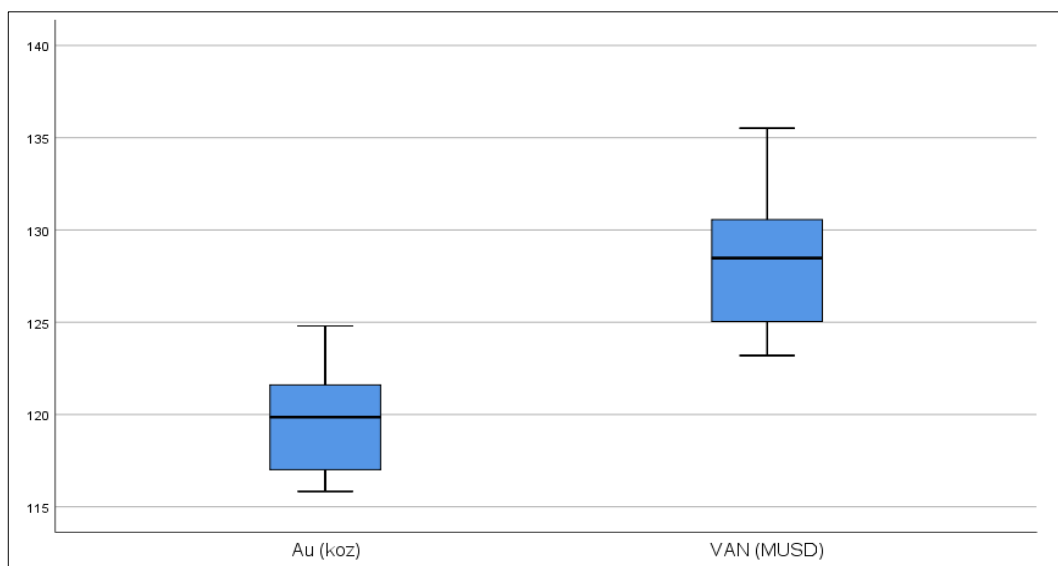
Figura 35
Caja bigotes variable tonelaje de mineral y desmonte



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 36 que las variables Onza Au y VAN, presentan una buena distribución normal, sin sesgos en la media, según a los resultados obtenidos en análisis de Shapiro-Wilk.

Figura 36
Caja bigotes variable onza de Au y VAN



Fuente: Elaboración propia.

- b) Análisis descriptivos de datos; luego de comprobar la normalización de las variables e identificar los valores erráticos, por medio del gráfico de bigotes, se procede a realizar el análisis estadístico descriptivo de las variables de estudio.

Tabla 16*Análisis estadístico descriptivo de las variables de estudio*

Estadístico	Contacto Au (g/t)	Mineral (Mt)	Au (g/t)	Au (koz)	VAN (MUSD)	Desmonte (Mt)	REM
Media	0,437	12,867	0,488	119,654	128,304	8,224	0,639
Mediana	0,440	12,870	0,490	119,860	128,480	8,230	0,640
Desviación	0,009	0,027	0,012	2,925	4,133	0,175	0,014
Desv. Error	0,002	0,005	0,002	0,585	0,827	0,035	0,003
Mínimo	0,420	12,810	0,470	115,830	123,200	7,830	0,610
Máximo	0,460	12,900	0,510	124,800	135,520	8,590	0,670
Rango	0,040	0,090	0,040	8,970	12,320	0,760	0,060

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17*Resumen de resultados*

Equipo	Estadístico	Contacto Au (g/t)	Mineral (Mt)	Au (g/t)	Au (koz)	VAN (MUSD)	Desmonte (Mt)	REM
Tajo Esperado (μ_1)	Media	0,44	12,87	0,49	119,65	128,30	8,22	0,64
	Desv.	0,01	0,03	0,01	2,93	4,13	0,18	0,01
	Desv. Error	0,00	0,01	0,00	0,59	0,83	0,04	0,00
Tajo Determinista (μ_2)	Valor	0,44	12,81	0,50	121,16	131,44	7,89	0,62

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 17, correspondientes a las variables de estudio contacto geológico, tonelaje de

mineral, ley Au, onza Au, VAN, tonelaje de desmonte y REM del tajo Morrenas, referente al estudio evaluación de la incertidumbre geológica en el planeamiento minero aplicado al diseño del tajo Morrenas.

4.2. Análisis y pruebas del contraste de hipótesis

4.2.1. Certeza de leyes

Para contrastar la hipótesis alternativa, las leyes influyen significativamente en el diseño del tajo Morrenas; Los indicadores de evaluación deben determinar la hipótesis alternativa (H1) y la hipótesis nula (Ho). Se definen las hipótesis de evaluación con respecto al indicador ley Au (g/t) para contrastar los resultados de influencia en la certeza del plan minero con una significancia (α): $\alpha = 0,05$.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 < \mu_2$; las leyes influyen significativamente en el diseño del tajo Morrenas.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; las leyes se mantienen en el diseño del tajo Morrenas.

La tabla 18 muestra que el P-valor (Sig = 0,000) es menor que la significancia ($\alpha = 0,05$). Por tanto, debido a la diferencia entre las medias, se decide rechazar H_0 ; y al observar los valores negativos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 < 0$), se acepta H_1 ; entonces, se puede afirmar que las leyes influyen significativamente en el diseño del tajo Morrenas, con una significancia del 5 %.

Tabla 18
Prueba hipótesis para el indicador Au (g/t)

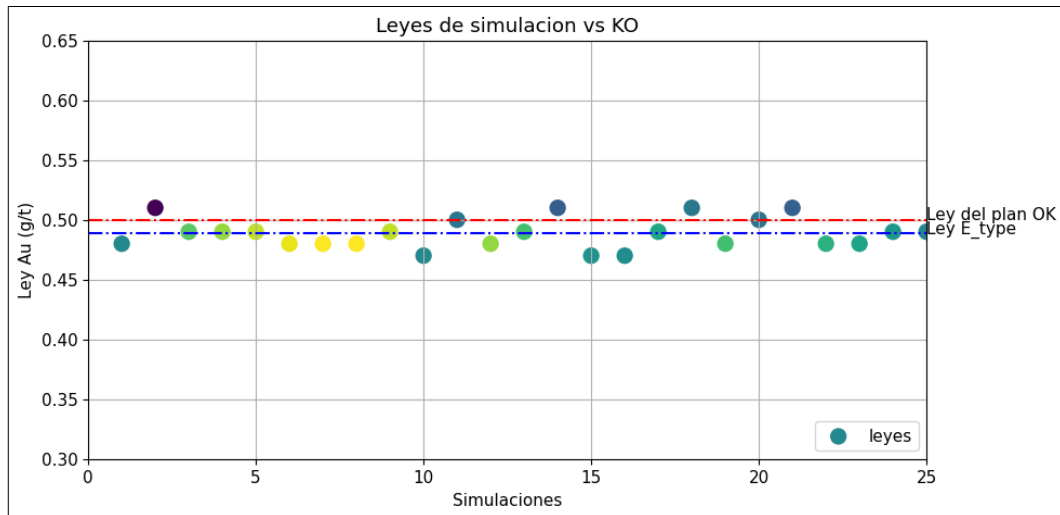
Prueba para una muestra						
Valor prueba = 0,50						
H1: $\mu_1 < \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$	T	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Intervalo confianza al 95 %	
					Inferior	Superior
Au (g/t)	-4,649	24	0,000	-1,160	-1,675	-0,645

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la probabilidad de cumplimiento del plan minero del tajo Morrenas, procedemos a aplicar el código del anexo 13 en lenguaje Python en la plataforma Google Colab. Realizamos el cálculo para un valor de 0,50 g/t obtenido al aplicar el método KO. Como se observa en la figura 37, las 25 simulaciones oscilan sobre el valor 0,488 g/t, que vendría a ser el valor promedio esperado de la ley Au, sin embargo, el plan de mina fue establecido para una ley de 0,50 g/t. Al aplicar el código, se obtiene una

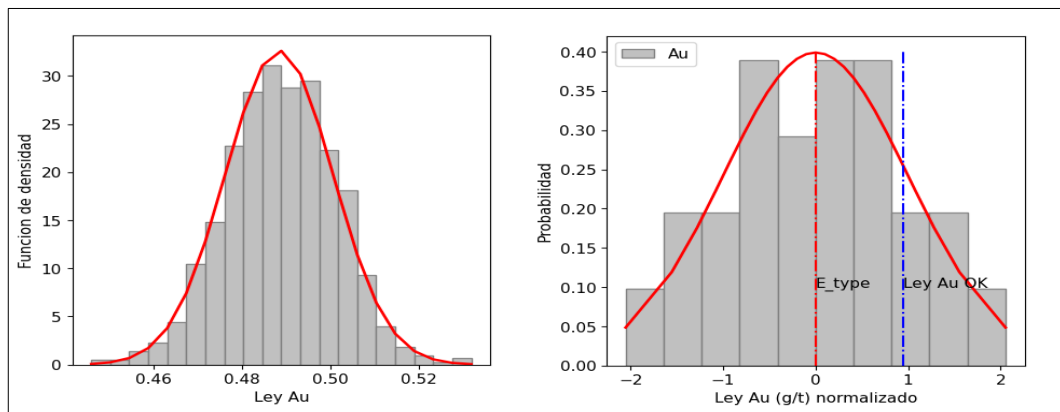
probabilidad del 83 % de que la ley del tajo Morrenas sea menor al 0,50 g/t.
 Por lo tanto, la probabilidad de cumplimiento es solo del 17 % (figura 38).

Figura 37
 Análisis del cumplimiento de minado del tajo Morrenas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 38
 Probabilidad esperada del cumplimiento de minado del tajo Morrenas



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Contacto geológico

Para contrastar la hipótesis alternativa, el contacto geológico influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas; los indicadores de evaluación deben determinar la hipótesis alternativa (H1) y la hipótesis nula (Ho). Se establecen las hipótesis de evaluación en relación con el contacto geológico Au (g/t) y se contrastan los resultados de influencia en la certeza del plan minero con una significancia (α): $\alpha = 0,05$.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 < \mu_2$; el contacto geológico influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; el contacto geológico mantiene el diseño del tajo Morrenas.

La tabla 19 muestra que el P-valor (Sig = 0,095) es mayor que la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, debido a que existe igualdad entre las medias, se decide rechazar H1. Además, al observar los valores negativos y positivos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 = 0$), se acepta Ho. Por tanto, se puede afirmar que el contacto geológico mantiene el diseño del tajo Morrenas, con una significancia del 5 %. Sin embargo, esto indica realizar

un estudio con un distinto enfoque, respecto a la estabilidad de taludes del diseño, para establecer su influencia.

Tabla 19
Prueba hipótesis para el indicador contacto geológico

Prueba para una muestra						
Valor prueba = 0,44						
H1: $\mu_1 < \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Intervalo confianza al 95 %	
					Inferior	Superior
Contacto Geológico	-1,739	24	0,095	-0,350	-0,766	0,065

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Evaluación económica

Para contrastar la hipótesis alternativa, la incertidumbre geológica influye significativamente en la evaluación económica del tajo Morrenas; los indicadores de evaluación deben determinar la hipótesis alternativa (H1) y la hipótesis nula (Ho). Se definen las hipótesis de evaluación con respecto al indicador VAN (MUSD) para contrastar los resultados de influencia en la certeza del plan minero con una significancia (α): $\alpha = 0,05$.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 < \mu_2$; la incertidumbre geológica influye significativamente en la evaluación económica del tajo Morrenas.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la incertidumbre geológica mantiene factible la evaluación económica del tajo Morrenas.

La tabla 20 muestra que el P-valor (Sig = 0,003) es menor que la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo que, debido a la diferencia entre las medias, se decide rechazar Ho; y al observar los valores negativos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 < 0$), se acepta H1; entonces, se puede afirmar que la incertidumbre geológica influye significativamente en la evaluación económica del tajo Morrenas, con una significancia del 5 %.

Tabla 20
Prueba hipótesis para el indicador VAN (MUSD)

Prueba para una muestra						
Valor prueba = 131,44						
H1: $\mu_1 < \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Intervalo confianza al 95 %	
					Inferior	Superior
VAN (MUSD)	-3,262	24	0,003	-2,696	-4,402	-0,990

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Diseño de tajo Morrenas

Para contrastar la hipótesis alternativa, la incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas; los indicadores de evaluación deben determinar la hipótesis alternativa (H1) y la hipótesis nula (Ho). Se definen las hipótesis de evaluación con respecto al indicador mineral (Mt) para contrastar los resultados de influencia en la certeza del plan minero con una significancia (α): $\alpha = 0,05$.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 < \mu_2$; la incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la incertidumbre geológica mantiene el diseño del tajo Morrenas.

La tabla 21, muestra que el P-valor (Sig = 0,000) es menor que la significancia ($\alpha = 0,05$). Entonces, debido a la diferencia entre las medias, se decide rechazar Ho; y al observar los valores positivos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 > 0$), se acepta H1; entonces se puede afirmar que la incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas, con una significancia del 5 %. Por lo que, la variable tonelaje de mineral (Mt) esperado es mayor al determinístico.

Tabla 21*Prueba hipótesis para el indicador tonelaje de mineral (Mt)*

Prueba para una muestra						
Valor prueba = 12,81						
H1: $\mu_1 < \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Intervalo confianza al 95 %	
					Inferior	Superior
Mineral (Mt)	12,424	24	0,000	0,668	0,557	0,779

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al indicador Onzas Au (koz); se definen las hipótesis de evaluación para contrastar los resultados de influencia en la certeza del plan minero con una significancia (α): $\alpha = 0,05$.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 < \mu_2$; la incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la incertidumbre geológica mantiene el diseño del tajo Morrenas.

La tabla 22 muestra que el P-valor (Sig = 0,030) es menor que la significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, debido a la diferencia entre las medias, se decide rechazar Ho; y al observar los valores negativos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 < 0$), se acepta H1; entonces se puede afirmar que la

incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas, con una significancia del 5 %. Por tanto, la variable Onzas Au (koz) esperado es menor al determinístico, lo que implica un menor ingreso económico al esperado.

Tabla 22
Prueba hipótesis para el indicador Onzas Au (koz)

Prueba para una muestra						
Valor prueba = 121,16						
H1: $\mu_1 < \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Intervalo confianza al 95 %	
					Inferior	Superior
Au (koz)	-2,300	24	0,030	-1,346	-2,553	-0,138

Fuente: Elaboración propia.

Se definen las hipótesis de evaluación con respecto al indicador de desmonte (Mt) para contrastar los resultados de influencia en la certeza del plan minero con una significancia (α): $\alpha = 0,05$.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 > \mu_2$; la incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.

- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la incertidumbre geológica mantiene el diseño del tajo Morrenas.

La tabla 23 muestra que el P-valor (Sig = 0,501) es mayor que la significancia ($\alpha = 0,05$). Como resultado, se decide rechazar H1, porque existe igual entre las medias; y al observar los valores negativos y positivos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 = 0$), se acepta Ho; entonces, se puede afirmar que la incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas, con una significancia del 5 %.

Tabla 23

Prueba hipótesis para el indicador tonelaje de desmonte (Mt)

Prueba para una muestra						
Valor prueba = 8,22						
H1: $\mu_1 > \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Intervalo confianza al 95 %	
					Inferior	Superior
Desmonte (Mt)	0,684	24	0,501	0,240	-0,484	0,964

Fuente: Elaboración propia.

En relación con el indicador REM, se definen las hipótesis de evaluación para contrastar los resultados de influencia en la certeza del plan minero con una significancia (α): $\alpha = 0,05$.

- Hipótesis alternativa (H1): $\mu_1 > \mu_2$; la incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.
- Hipótesis nula (Ho): $\mu_1 = \mu_2$; la incertidumbre geológica mantiene el diseño del tajo Morrenas.

La tabla 24 muestra que el P-valor (Sig = 0,000) es menor que la significancia ($\alpha = 0,05$). Por tanto, debido a la diferencia entre las medias, se decide rechazar Ho; y al observar los valores negativos del intervalo de confianza ($\mu_1 - \mu_2 > 0$), se acepta H1; entonces, se puede afirmar que la incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas, con una significancia del 5 %.

Tabla 24
Prueba hipótesis para el indicador REM

Prueba para una muestra						
Valor prueba = 0,62						
H1: $\mu_1 > \mu_2$ Ho: $\mu_1 = \mu_2$	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Intervalo confianza al 95 %	
					Inferior	Superior
REM	10,837	24	0,000	2,916	2,361	3,472

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Discusión de resultados

4.3.1. Resultado de certeza de leyes

De acuerdo al análisis de contraste de hipótesis, las leyes influyen significativamente en el diseño del tajo Morrenas, el presente estudio se centra en la variabilidad de la ley de oro equivalente (Au Eq), obteniendo como resultado la sobrestimación de las leyes del yacimiento Morrenas. Desde este enfoque, se puede evidenciar que la variabilidad de 2,3 % es significativa, entonces, las leyes influyen en el diseño esperado del tajo Morrenas respecto al valor determinístico, afectando de esta forma al plan de minado y VAN del proyecto. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación de los estudios de Peirano (2011) y McCarthy (2003).

4.3.2. Resultado de contacto geológico

De acuerdo al análisis de contraste de hipótesis, el contacto geológico influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas, la variable contacto geológico respecto al indicador Au Eq (g/t) de la alteración Morrénica, se redujo en 1,73 % respecto al determinístico, sin embargo, esta variabilidad no presenta significancia en el plan de minado

del tajo Morrenas, porque el diseño operativo del tajo intercepta solamente la unidad geológica de alteración morrénica.

Desde este enfoque, su influencia no es representativa en el diseño, sin embargo, el posible crecimiento del tajo Checocollo, implicaría realizar un análisis más especializado, respecto al comportamiento de las leyes en los límites de contacto de cada unidad geológica, en congruencia, para estudios posteriores de sinergia de explotación entre el tajo Morrenas y tajo Checocollo, es necesario realizar un cambio de enfoque al estudio, evaluando el comportamiento de las leyes respecto a cada unidad geológica respecto a la alteración, enfocando el análisis a la estabilidad de los taludes finales del tajo. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación de los estudios de Villa Muñoz (2012) y Peirano (2011).

4.3.3. Resultado de evaluación económica

De acuerdo al análisis de contraste de hipótesis, la incertidumbre geológica influye significativamente en la evaluación económica del tajo Morrenas, el presente estudio se centra en la variabilidad del VAN (MUSD) del tajo Morrenas, obteniendo como resultado la sobrestimación de los ingresos esperados. Desde este enfoque, se puede evidenciar que la

variabilidad de 2,4 % es significativa, entonces, la variabilidad del VAN influye en el diseño esperado del tajo Morrenas respecto al valor determinístico, afectando de esta forma al plan de minado, sin embargo, el resultado del VAN del proyecto no afecta a la factibilidad del proyecto tajo Morrenas, al ser económicamente viable. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación de los estudios de Franco (2017), Ordeñana (2017) y Letelier (2012).

4.3.4. Resultado de diseño tajo Morreas

De acuerdo al análisis de contraste de hipótesis, la incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas, el presente estudio se centra en la variabilidad del Mineral (Mt), Onzas Au (koz), Desmonte (Mt) y REM del tajo Morrenas, obteniendo como resultado la sobrestimación en las onzas Au esperadas (1,2 %), además de un incremento dimensional en el tonelaje de mineral (0,4 %), tonelaje de desmonte (4,2 %) y REM (3,8 %), implicando de esta forma cambios significativos en el diseño del tajo Morrenas.

Desde este enfoque, se puede evidenciar que la variabilidad de las variables mencionadas es significativa, entonces, influyen en el diseño

esperado del tajo Morrenas respecto al valor determinístico. Por lo tanto, se logró una congruencia con la afirmación de los estudios de Prieto (2019), Ordeñana (2017) y Letelier (2012).

CONCLUSIONES

La incertidumbre geológica influye en el diseño del tajo Morrenas, obteniéndose un incremento del 0,4 % en la capacidad de mineral y 5 % en desmonte, y una reducción del 1,2 % en finos de oro, generando un impacto del 3,14 MUSD en el VAN del tajo Morrenas y dimensiones establecidas en el informe de factibilidad.

La variabilidad del 2,3 % de las leyes de oro equivalente influyen significativamente en el diseño del tajo Morrenas respecto al valor determinístico, afectando de esta forma al VAN del proyecto minero.

La variabilidad certeza de la variable contacto geológico de la alteración Morrénica respecto a la ley de oro se redujo en 1,73 % debido a que el diseño operativo del tajo intercepta solamente a la unidad geológica de alteración morrénica. El posible crecimiento del tajo Checocollo, implicará realizar un análisis más especializado de los contactos geológicos, respecto a las unidades de alteración del tajo Checocollo y tajo Morrenas.

La incertidumbre geológica influye significativamente en la evaluación económica del tajo Morrenas, generando una sobrestimación del 2,3 % en

el VAN determinístico, sin embargo, este impacto no afecta la viabilidad del tajo Morrenas, esperando un VAN de 128 MUSD con mayor certeza de cumplimiento, asegurando de esta forma la factibilidad de las operaciones.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a la viabilidad económica del diseño del tajo Morrenas, se recomienda analizar un plan de acción que incluya el secuenciamiento de minado, para el seguimiento y control de las estrategias de operación donde se incluya la incertidumbre geológica.

De acuerdo a la influencia de las leyes en los planes de minado, se sugiere realizar un control de cumplimiento del modelo de finos establecidos en el largo plazo respecto al corto plazo, el cual servirá como base para generar un plan semanal bajo incertidumbre geológica.

Se recomienda fomentar un estudio geotécnico de los taludes finales del tajo Morrenas, para establecer la influencia de la variabilidad en la estabilidad de taludes, y determinar la probabilidad de falla.

De acuerdo a la evaluación económica de los escenarios de operación para la explotación del tajo Morrenas, se recomienda realizar una evaluación probabilística del sistema de transporte del carguío y acarreo del tajo Checocollo y Morrenas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anddes (2014). *Estudio de peligro sísmico de la mina Pucamarca*. Unidad Minera Pucamarca.

Cahuana, W. (2019). *Aplicación de la simulación condicional a los dominios de estimación de recursos de la mina Cujone*. Universidad Nacional de Huancavelica.

Cerda Zamudio, C. (2016). *Análisis de riesgo asociado a incertidumbre operacional en planes mineros para minería a cielo abierto*. Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/>.

Chávez Ramos, N. (2020). *Modelamiento y planificación de proyectos mineros*. Minconsulting, Conferencia de CIP, Perú.

Choquehuayta Sánchez, S. (mayo, 2020). *Planeamiento a corto plazo en minería a cielo abierto, mina Constancia*. I Congreso Virtual de Conexión Minera – Conexmin, Simposio dirigido por la UNSA, Perú.

Dimitrakopoulos, R. (2011). *Planificación estratégica de minas bajo incertidumbre*. Revista de Ciencia Minera, 47.

Dominy, S., Noppé, M. y Annels, A. (2004). *Error e incertidumbre en la estimación de recursos minerales y reservas minerales: la*

importancia de hacerlo bien. Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo, 11, 77-98.

Franco Sepúlveda, G. (2017). *Modelo de optimización estocástica para explotaciones mineras a cielo abierto.* Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59922/>.

Gacitúa Carafi, J. (2010). *Aplicación de una heurística escalable para resolver un problema estocástico de planificación minera.* Universidad de Chile. <http://repositorio.uchile.cl/>.

García Avilés, G. (2020). *Nuevas tendencias en planificación estratégica minera.* Vortex Mining Consultants, Perú.

GEM (2013). *Planificación Minera en Tiempos Inciertos.* Perspectivas GEM Julio 2013.

González, J. (2015). *Buenas Prácticas en la Planificación en el Contexto de un Proyecto.* GeoMine Associates, Santiago de Chile.

Guerra, C. (mayo, 2020). *Planeamiento estratégico de explotación minera en fase de operación, mina Chinalco.* I Congreso Virtual de Conexión Minera – Conexmin, Simposio dirigido por la UNSA, Perú.

- Guzmán, J. (2019). *Determinación de Reservas y Macrosecuencia de Explotación Bajo Incertidumbre*. Seminario Estimación de Recursos y Reservas Minerales, GEM, Barcelona.
- Hartman, H. L. (1992). *SME Manual de Ingeniería de Minas*. Littleton: SME.
- Horsley T. P. (2002). *Planificación Minera Impulsada por el Dólar: La Perspectiva Corporativa para la Planificación Minera Operativa*. Material de referencia AMC.
- Hustrulid, W., Kuchta, M. & Martin, R. (2013). *Planificación Minera a Cielo Abierto y Diseño, 3rd Ed.* Boca Raton: CRC Press.
- Johnson, T. B. (1968). *Programación Óptima de la Producción Minera a Cielo Abierto*. Universidad de California, Berkeley.
- JORC (2012). *Código de Australasia para la presentación de informes de recursos minerales y reservas de mineral identificadas* (pp. 7–10). Instituto Australiano de Geocientíficos y Minerales, Consejo de Australia.
- Leite, A. & Dimitrakopoulos, R. (2014). *Modelo de Optimización Estocástica a Cielo Abierto*. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología Minera, volumen (24), pp. 755 – 762.

Lerchs, Helmut & Grossmann (1965). *Diseño Óptimo de Minas a Cielo Abierto*. Transacciones, C.I.M. LXVIII, pp. 17-24.

Letelier, I. (2012). *Impacto de la Incertidumbre del Modelo Geológico en un Proyecto Minero*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Lichtin, C. (2016). *Gestión de Riesgos y Valorización de Medidas de Gestión en la Planificación Minera*. Gestión y Economía Ltda. – GEM, Chile.

Lozano, J. (2020). *Simulación y Optimización de Transporte de Materiales en una Mina*. ISEE, Perú.

Maldonado, J. (2022). *Explotación del Tajo Morrenas en Mina Pucamarca*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Perú.

Manríquez, F. (2015). *Evaluación de la Incertidumbre Geológica y Operacional en Planes Mineros a Corto Plazo en minas a Cielo Abierto*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

McCarthy, P.L. (2003). *Gestión de Riesgos Técnicos para Estudios de Viabilidad Minera*. Conferencia de Gestión de Riesgos Mineros. Instituto Australiano de Minería y Metalurgia, pp. 21 - 27.

Mendoza, J. (2016). *Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran*

altura en la mina Antapaccay. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Mery, N. (2016). *Modelamiento Geoestadístico de la Incertidumbre en Leyes y Tipos de Roca en un Yacimiento Férrico*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

MineDesk (2020). *Estimación de Flota Minera para Mina a Cielo Abierto*. Nuevas Fuerzas, Perú.

MINEM (2010). *D.S. N° 055 - 2010 - EM*. Minería Ministerio de Energía y Minas.

Minsur SA (2016). *Informe mensual de operaciones mineras*. Unidad Minera Pucamarca.

Montoya. (2008). *Simulación Geoestadística de Atributos Geológicos y Ambientales y su Aplicación a la Planificación Minera*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Mun, J. (2006). *Modelado de Riesgo, Aplicación de Simulación Monte Carlo, Análisis de Opciones Reales, Predicción y Técnicas de Optimización*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Nelis, G. (2016). *Planificación Adaptativa Utilizando Simulación Geoestadística Antitética*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Ordeñana, A. (2017). *Diseño de Planificación Minera a Cielo Abierto de un Yacimiento Aurífero Considerando la Incertidumbre Geológica*. Escuela Superior Politécnica de Litoral, Guayaquil, Ecuador.

OSINERGMIN (2017). *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas*. In Minería y Geología.

Peirano, F. (2011). *Definición de Tajo Final Capacitado Bajo Incertidumbre*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Pervol (2016). *Unidad Minera Pucamarca estudio de factibilidad tajo Morrenas*. Pervol, Minsur SA.

Prieto, J. (2019). *Planificación Minera Bajo Incertidumbre Geológica en Minas a Cielo Abierto*. Universidad Andrés Bello, Santiago de Chile.

Retto, O. (2015). *Determinación de la Altura de Banco Óptimo con Simulación Geoestadística*. Convención Minera, PERUMIN – 32.

Ríos, I. (2014). *Modelamiento, Estimación y Generación de Árboles de Escenarios para Precios de Cobre*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Rubio, E. (2007). *Tópicos Avanzados en Planificación Minera*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.

- Salazar, E. (2020). *Integración en el Planeamiento a Mediano Plazo*. SME, Perú.
- Saravia, J. & González, M. (2014). *Nuevas Metodologías Aplicadas a la Planificación Estratégica*. Gemcom GEMS, GEOVIA, Chile.
- Siebert, M. (2015). *Metodología para la Comparación entre Planes Mineros Estocásticos y Determinísticos*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- SNMPE (2014). *Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía*.
- Springer (Ed.). (2018). *Avances en la Planificación Estratégica de Minas*. Canadá: Roussos Dimitrakopoulos. AusIMM.
- Viejo, C. (2013). *Diseño de Rajo y Planes Mineros para los Minerales Sulfurados de Compañía Minera del Norte (CMDN)*. Universidad de la Serena, La Serena.
- Villa, C. (2012). *Resolución de un Problema Estocástico de Planificación Minera de Largo Plazo para el Proyecto Quetena de Codelco*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Vivanco, D. (mayo, 2020). *Aplicaciones de IA en Operaciones Mineras*. VALE, Inteligencia Artificial. Simposio dirigido por VALE, Perú.

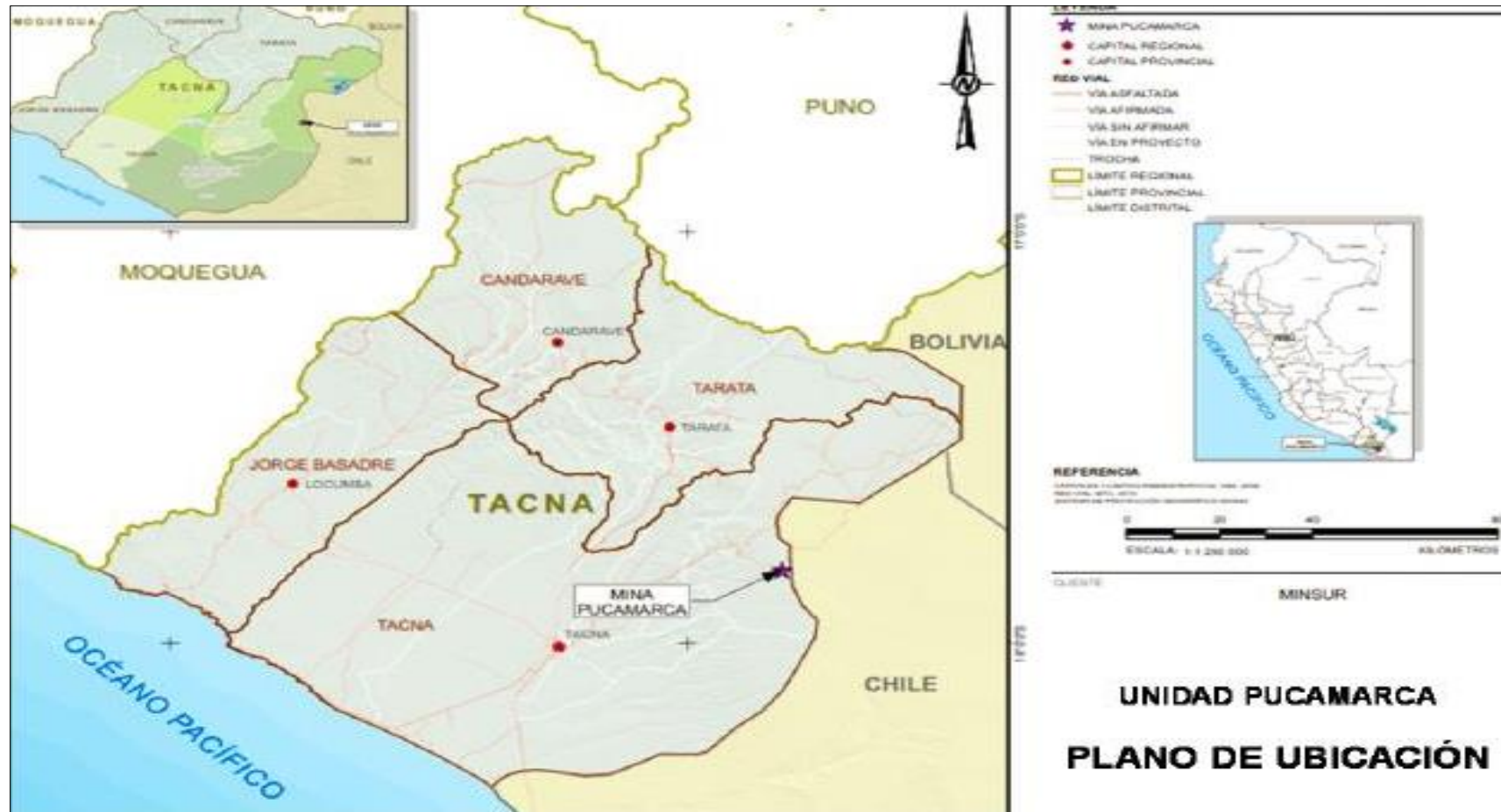
ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Título	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Indicadores	Metodología
Evaluación de la Incertidumbre Geológica en el Planeamiento Minero Aplicado al Diseño del Tajo Morrenas, 2023	Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Variable Independiente	Tipo de Investigación
	¿Cómo influye la incertidumbre geológica en el planeamiento minero aplicado al diseño del tajo Morrenas?	Evaluar el impacto de la incertidumbre geológica en el diseño del tajo Morrenas.	La incertidumbre geológica influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.	VI 1: Diseño del tajo Morrenas	Tajo determinista (Td) Tajo esperado (Te)	Investigación aplicada de enfoque cuantitativo.
						Nivel de Investigación
						Investigación correlacional y predictivo.
				VI 2: Incertidumbre geológica	Enfoque geológico (EG)	Método de Investigación
						La investigación es de carácter no experimental, de diseño transversal correlacional.
	Problema Específico	Objetivo Específico	Hipótesis Específico	Variable Dependiente	Variable Dependiente	Población y Muestra
	¿En qué medida influye la certeza de leyes respecto al diseño del tajo Morrenas?	Determinar la influencia de la certeza de leyes en el diseño del tajo Morrenas.	La certeza de leyes influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.	VD: Evaluación económica del tajo Morrenas	VANd = VAN determinista VANE = VAN esperado	La población se enmarca en el yacimiento del proyecto minero tajo Morrenas de la Unidad Minera Pucamarca del distrito de Palca, provincia y departamento de Tacna. La muestra se enfoca principalmente en los escenarios probables obtenidos de la simulación condicional, generados a partir de la información geológica del estudio de factibilidad del tajo Morrenas, realizados por Pervol (2016).
				Variables Asociadas	Variables Asociadas	Técnicas e Instrumentos
	¿Cómo influye el contacto geológico en el diseño del tajo Morrenas?	Establecer una metodología para evaluar la influencia del contacto geológico en el diseño del tajo Morrenas.	El contacto geológico influye significativamente en el diseño del tajo Morrenas.	Modelo económico Modelo de alteraciones Zonificación Geotécnica	Parámetros económicos Tipo de alteración Parámetros geotécnicos	La recolección de datos está basada en el análisis documental del proyecto tajo Morrenas y la evaluación determinista y estocástica del yacimiento. Los instrumentos son Laptop de escritorio, programas estadísticos y mineros como SGeMS, Isatis, SimSched PO, Recmin y Python; programas estadísticos como SPSS y programas de MS Office.
						Técnicas de Procesamiento de Datos
	¿Cómo influye la incertidumbre geológica en la evaluación económica del tajo Morrenas?	Realizar la evaluación económica del tajo Morrenas considerando la incertidumbre geológica.	La incertidumbre geológica influye significativamente en la evaluación económica del tajo Morrenas.	Modelo metalúrgico	Recuperación	El tratamiento de datos correspondiente para la VI 1, se realizará la optimización económica del tajo Morrenas. Para el tratamiento de datos correspondiente a la VI 2, se aplicará la metodología determinista y estocástica. Y finalmente para la variable VD, se realizará la prueba de t Student, para determinar si se acepta o se rechaza la hipótesis del presente estudio.

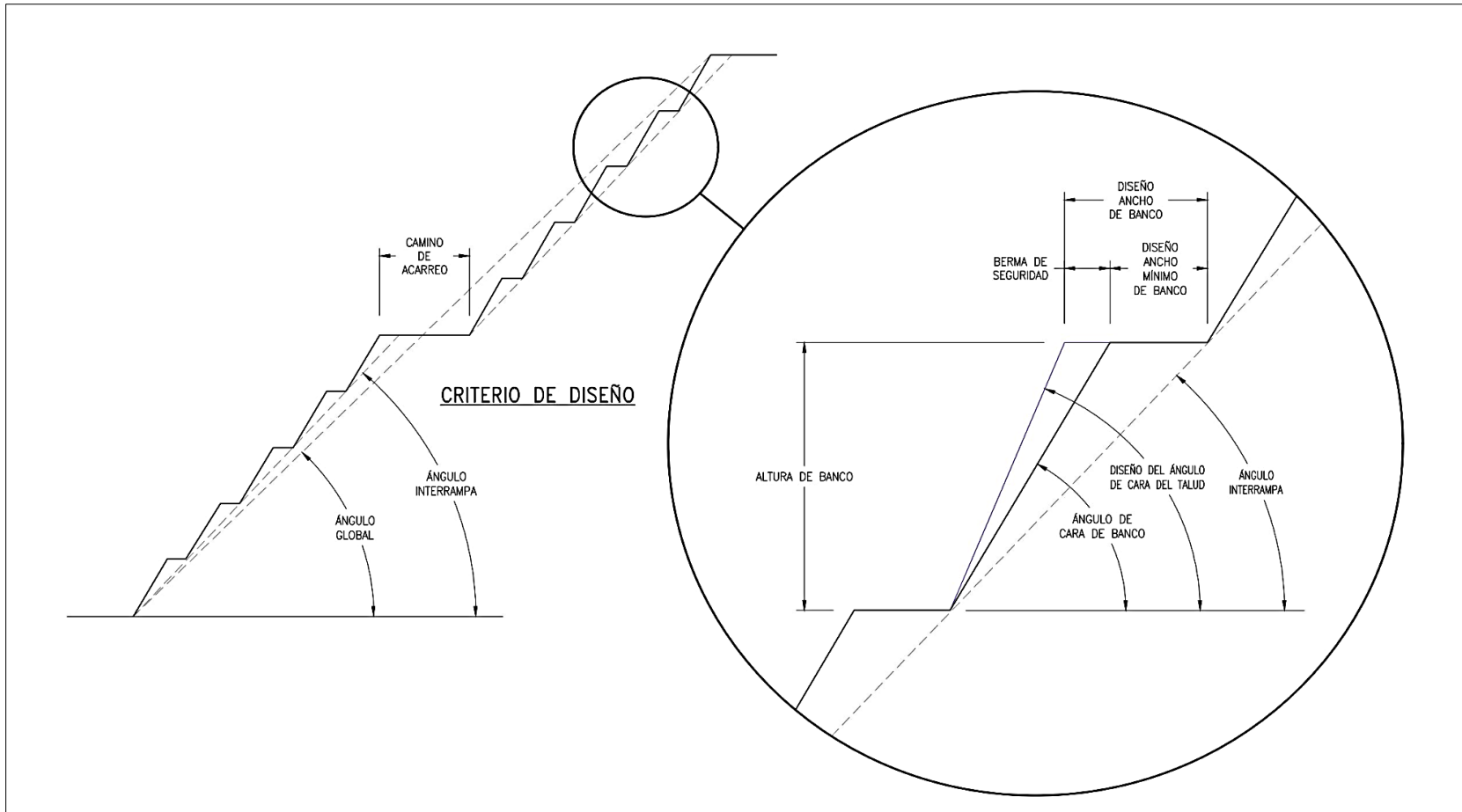
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Ubicación de la mina Pucamarca



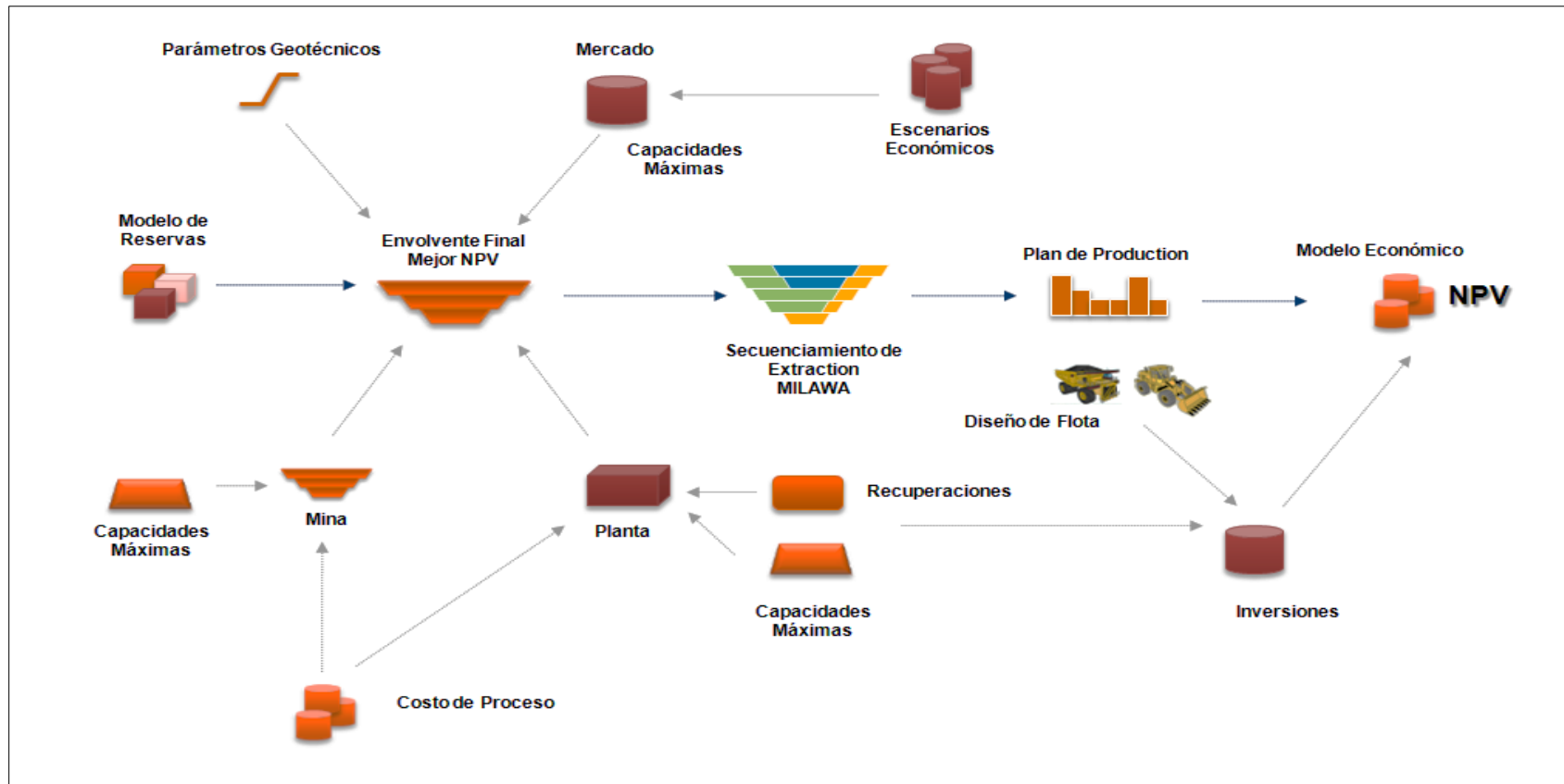
Fuente: Pervol, 2016.

Anexo 3. Configuración de diseño



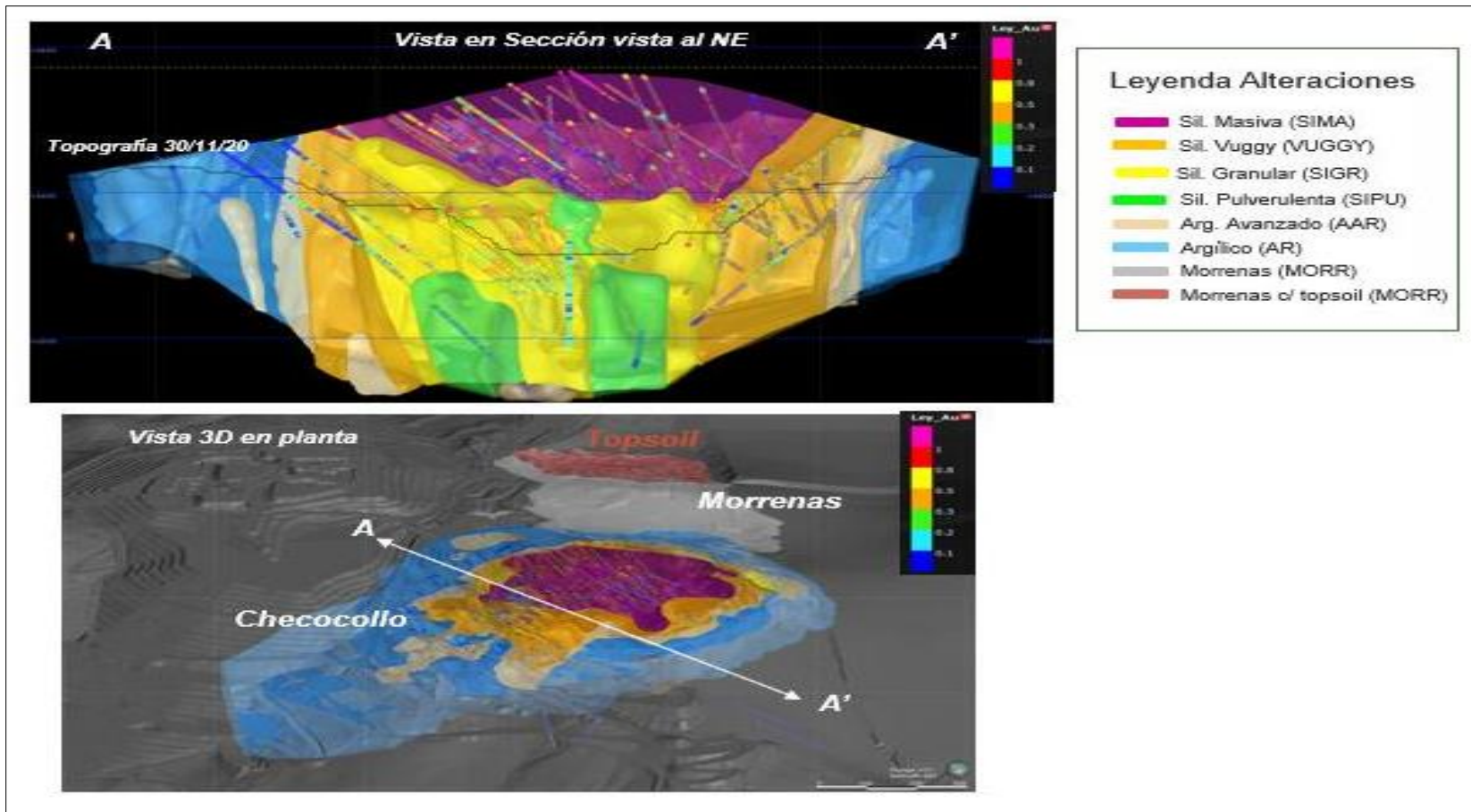
Fuente: Pervol, 2016.

Anexo 4. Diagrama del modelo de optimización tajo final



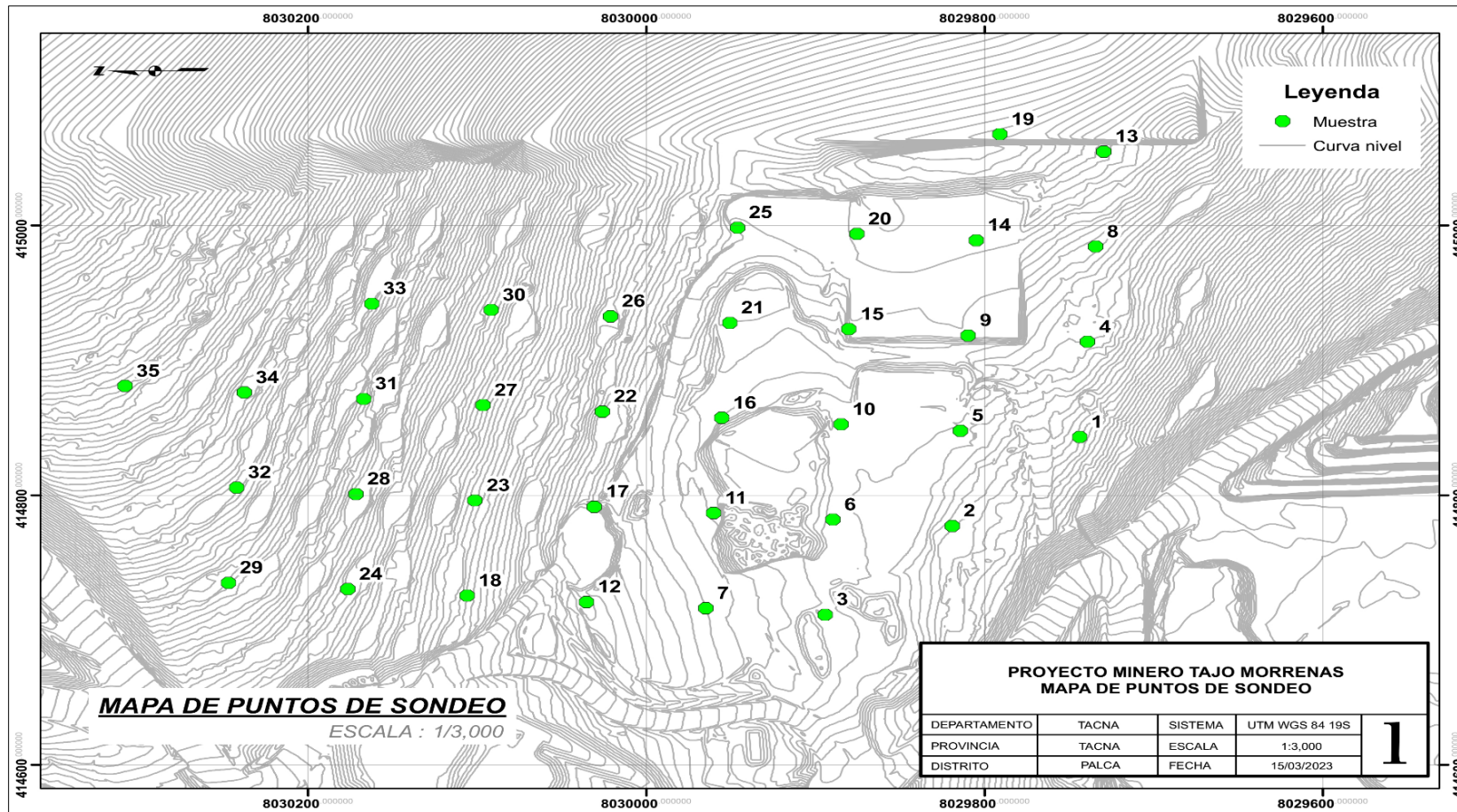
Fuente: Viejo, 2013.

Anexo 5. Modelos geológicos de alteraciones



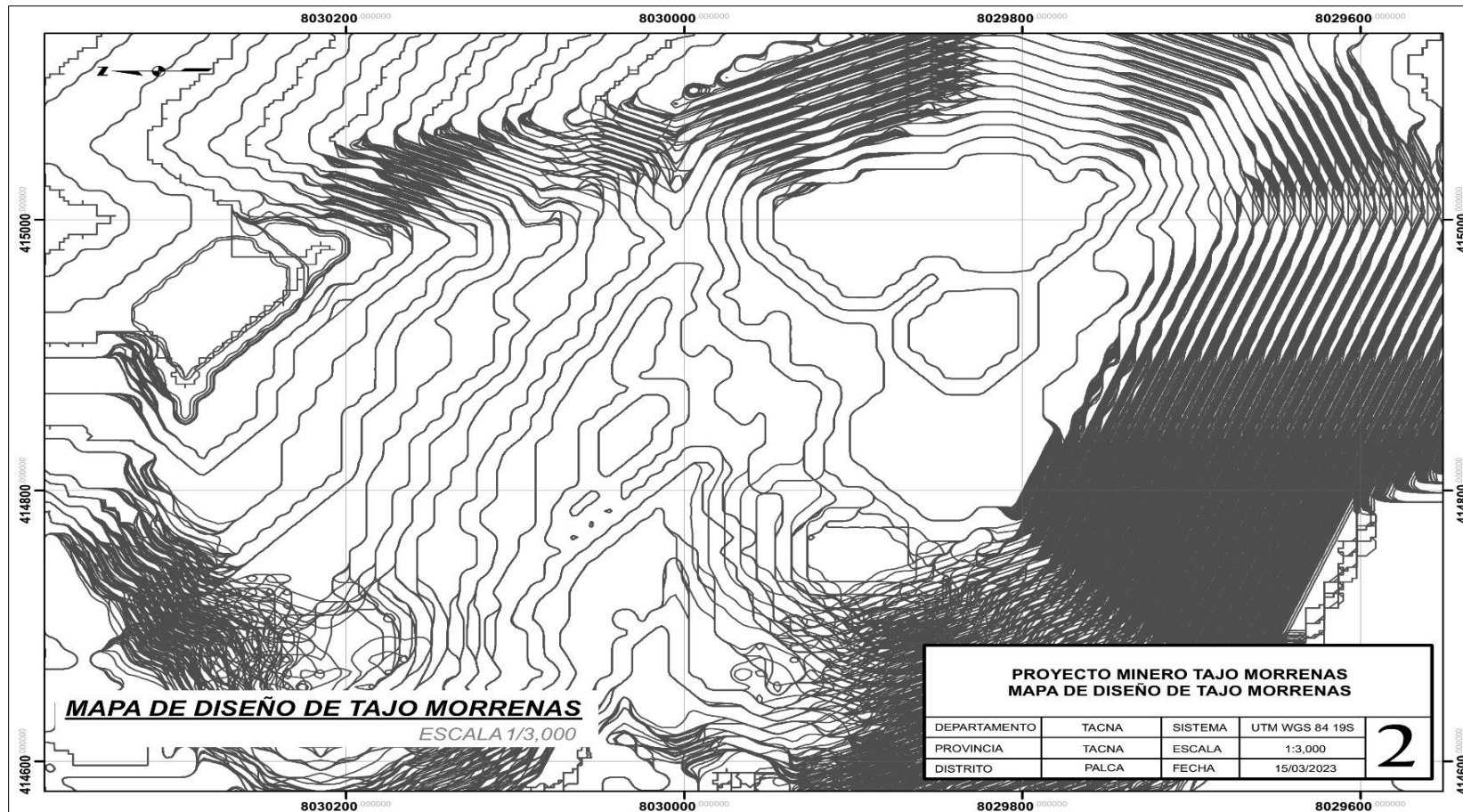
Fuente: Pervol, 2016.

Anexo 6. Ubicación de puntos de sondeos



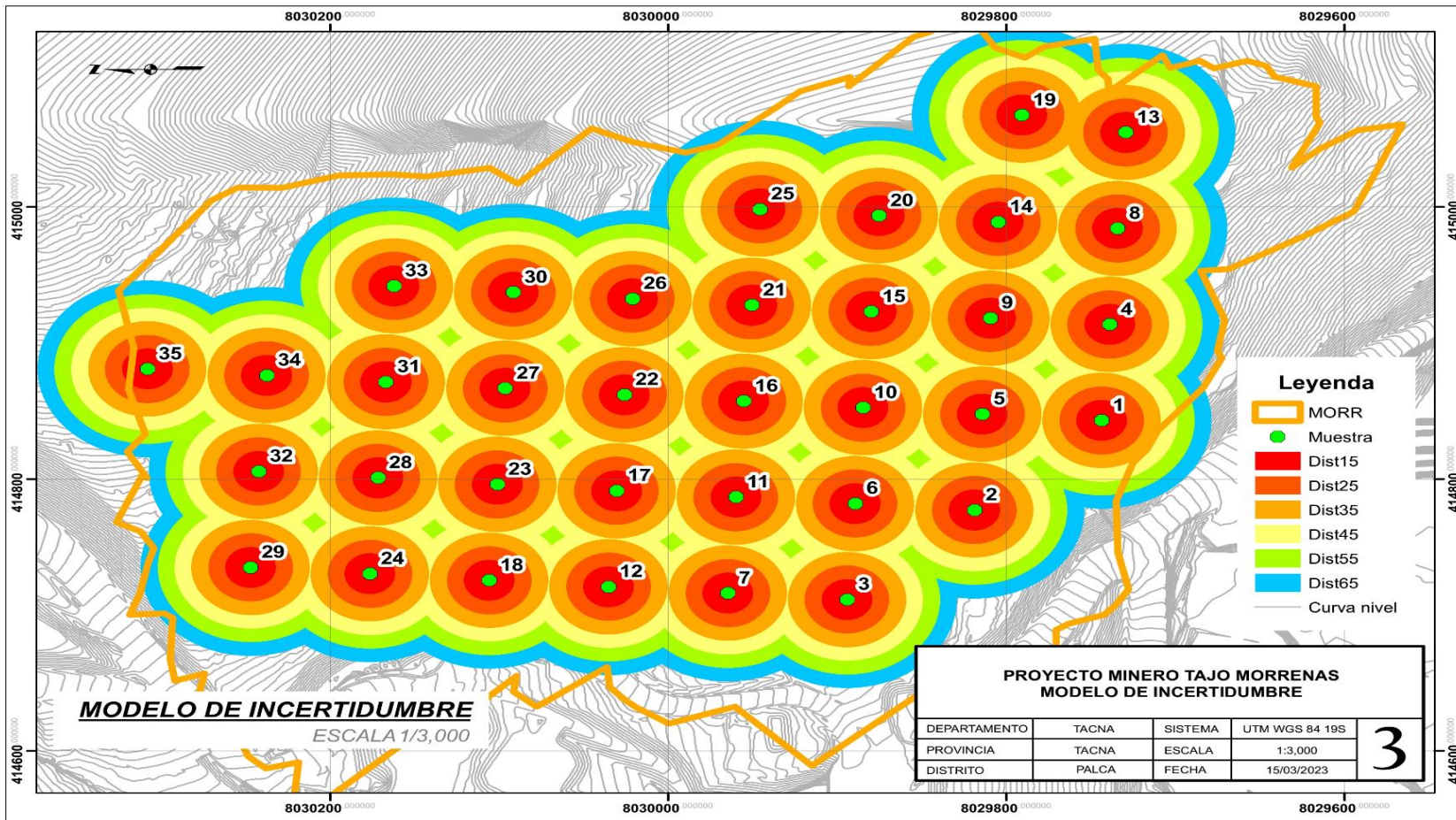
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7. Diseño optimizado de tajo Morrenas



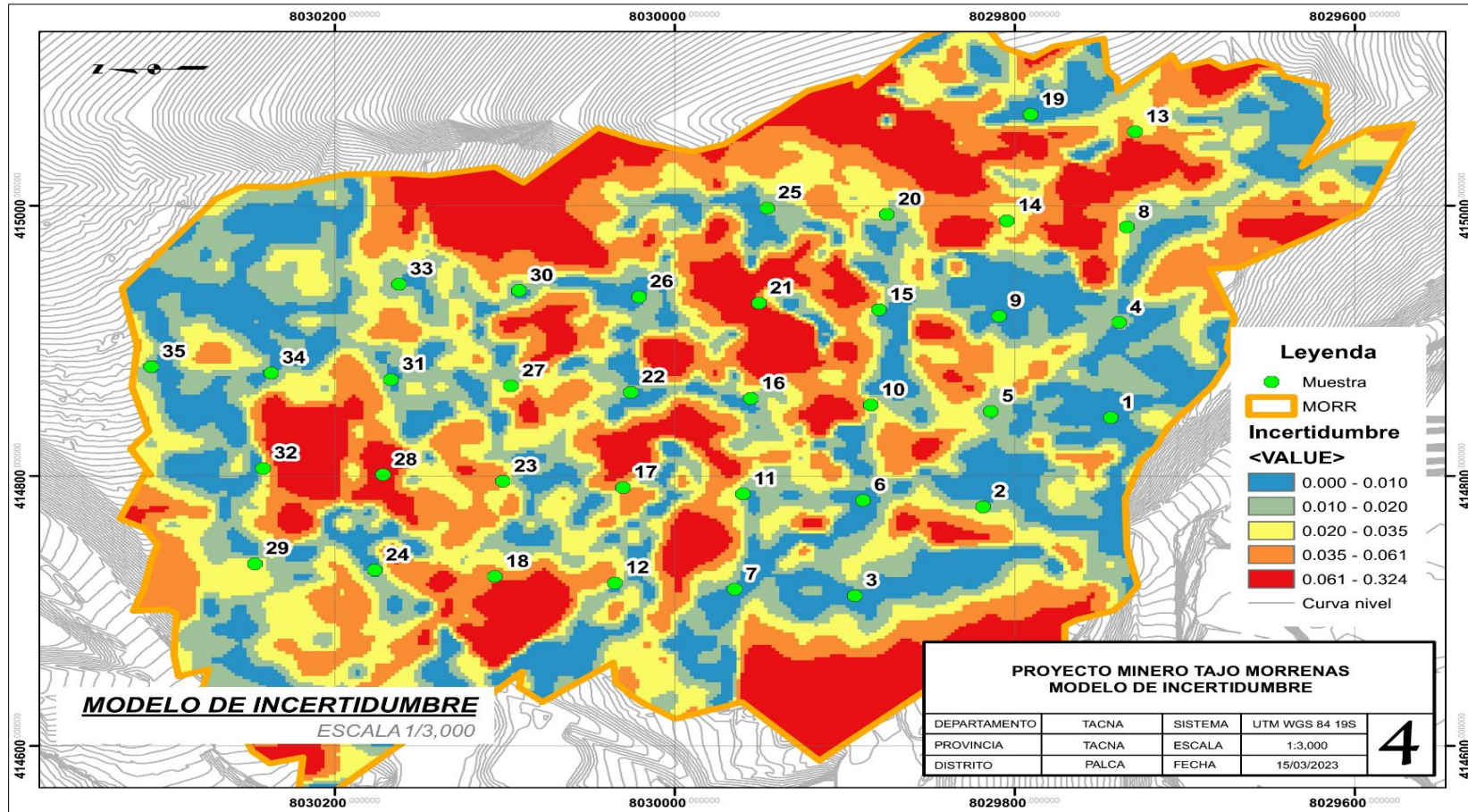
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 8. Modelamiento de distancia de influencia



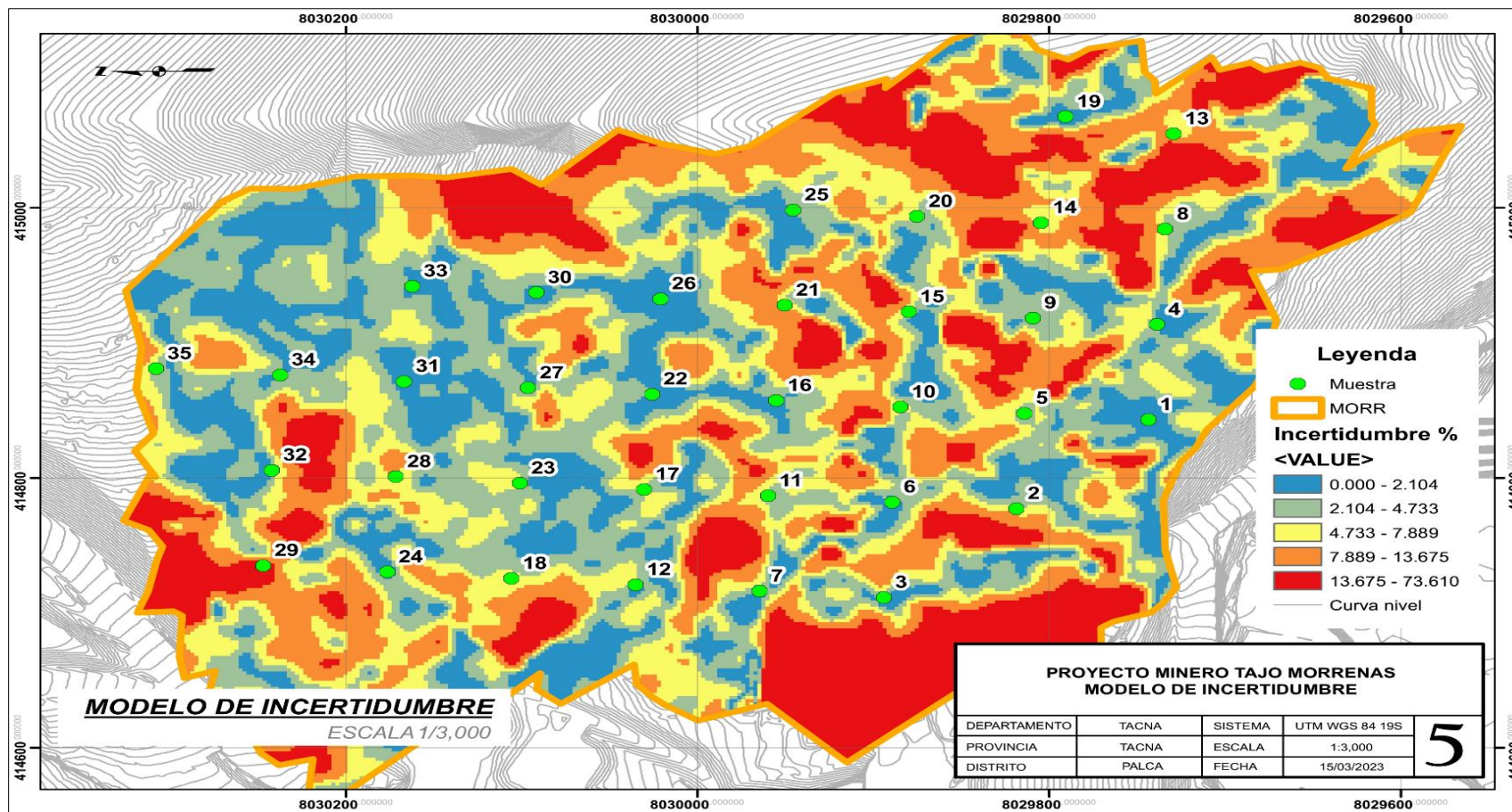
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9. Modelamiento de Incertidumbre



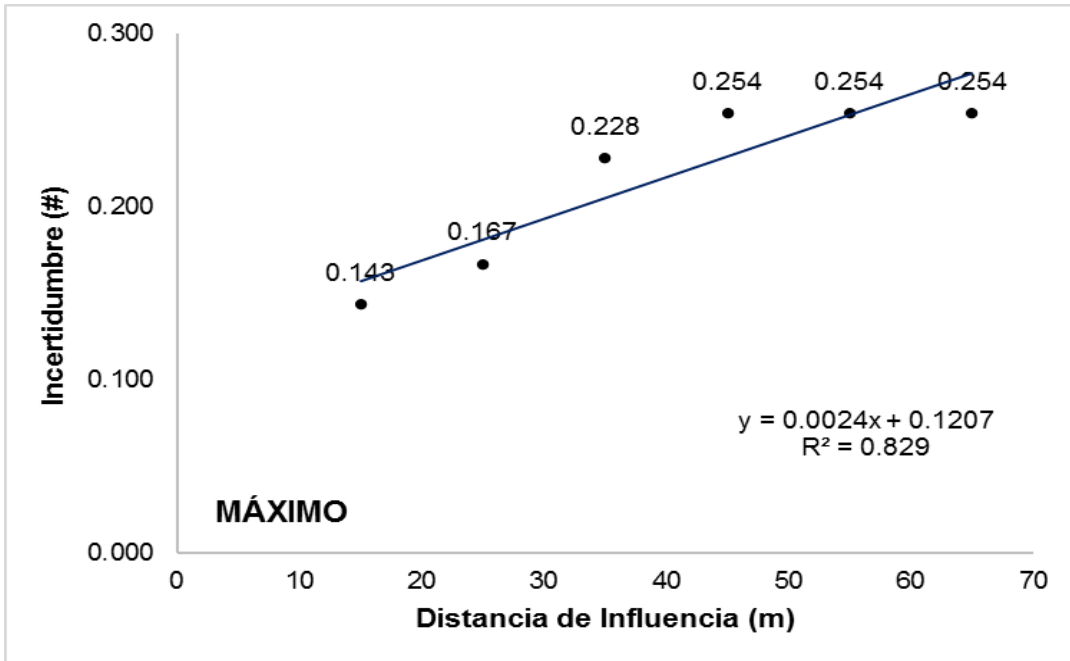
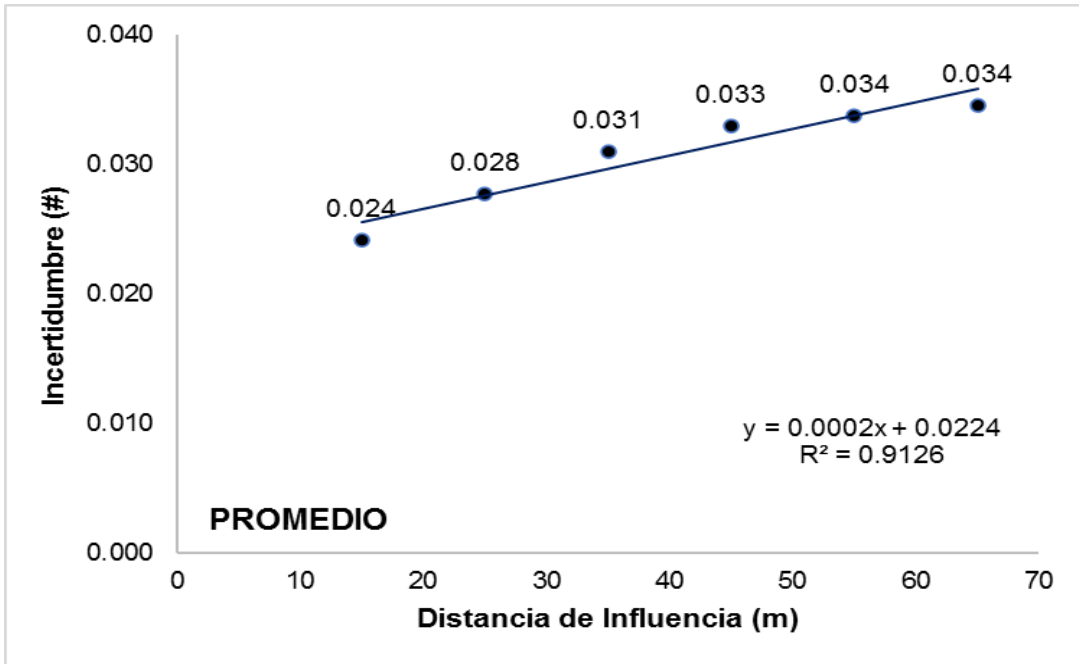
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Modelamiento de Incertidumbre en porcentaje



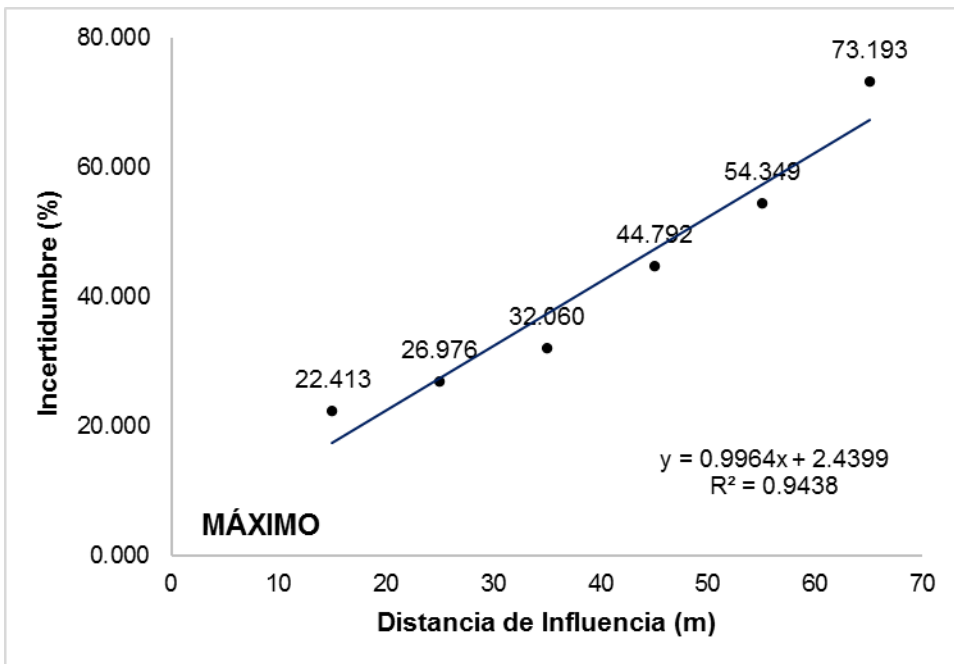
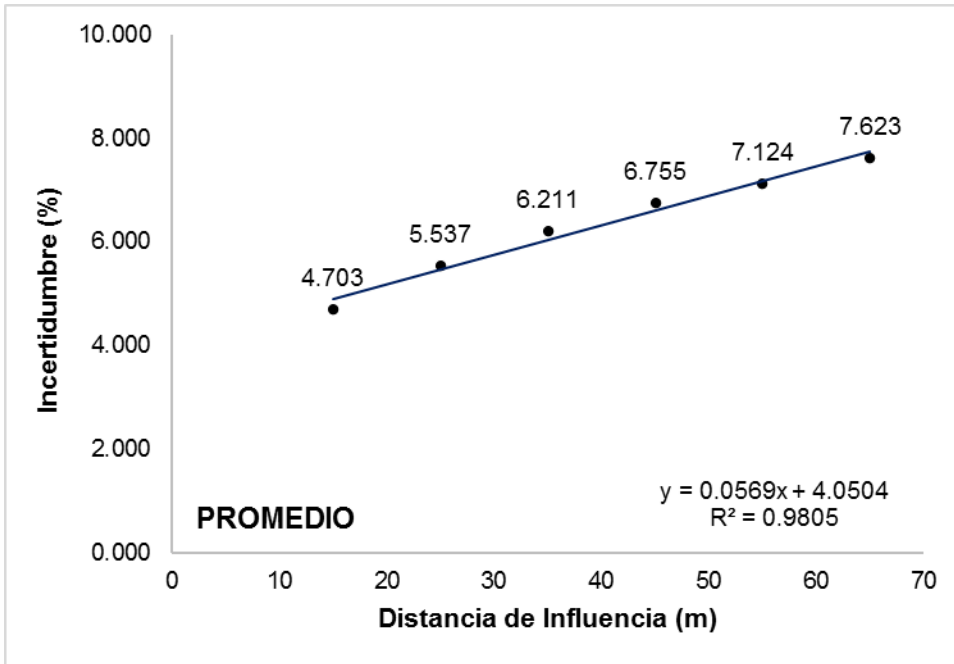
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11. Modelamiento de la incertidumbre según tendencia



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12. Modelamiento de la incertidumbre % según tendencia



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 13. Código Python Adaptado

Tajo con Incertidumbre

```
[1] import scipy.spatial as sps
    from scipy.stats import norm
    import pandas as pd
    import matplotlib as mpl
    import matplotlib.pyplot as plt
    import numpy as np
    import math
    import os
```

Formato de gráfico

```
[2] def demo(sty):
    mpl.style.use(sty)

    demo('default')

    #demo('seaborn')

    def setfs ( s ):
        font = {'family' : 'DejaVu Sans',
                'weight' : 'normal',
                'size' : s}

        mpl.rc('font', **font)

    setfs ( 11 )
```

Cargado de data de leyes de Tajo

```
from google.colab import files
files.upload()
```

Elegir archivos MORR_PIT...python.csv

- MORR_PIT_SIMUpython.csv(text/csv) - 156 bytes, last modified: 30/3/2024 - 100% done

Saving MORR_PIT_SIMUpython.csv to MORR_PIT_SIMUpython.csv

```
{'MORR_PIT_SIMUpython.csv':
b'Cortar\r\n0.48\r\n0.51\r\n0.49\r\n0.49\r\n0.49\r\n0.48\r\n0.48\r\n0.48\r\n0.49\r\n0.47\r\n0.5\r\n0.4
```

```
[5] data = pd.read_csv('MORR_PIT_SIMUpython.csv')
    print("Data loaded, size: ", data.values.shape, flush = True)
    data.rename(columns = {"Cortar":'Sim'}, inplace = True)
    data.head()
```

Data loaded, size: (25, 1)

	Sim
0	0.48
1	0.51
2	0.49

```

0s data = data.values #valor transformado en dataframe
ndata = data.shape[0] #numero de muestra de leyes pit
y = data[:,0] #leyes de la simulaciones
min = np.min(y)
print("Valor Mínimo:""{0:.3f}".format(min))
max = np.max(y)
print("Valor Maximo:""{0:.3f}".format(max))
ndata #numero de simulaciones

```

```

Valor Mínimo:0.470
Valor Maximo: 0.510
25

```

Análisis de la ley del Tajo

```

0s [7] E_type = np.mean(y,axis=0) #ley media de simulaciones
var = np.var(y,axis=0) #varianza de simulaciones
desv = np.std(y,axis=0) #desviacion estandar de simulaciones
ley_ok = 0.50 #ley del pit por KO
ley_ok_dsv = (0.50-E_type)/desv #ley de pit por KO estandarizado

print('Ley reportada OK',"{0:.3f}".format(ley_ok)) #modelo caso base KO
print('Ley estandarizada',"{0:.3f}".format(ley_ok_dsv))
print('Ley media (Etype)',"{0:.3f}".format(E_type))
print('Varianza',"{0:.3f}".format(var))
print('Desviacion estandar',"{0:.2f}".format(desv))

```

```

Ley reportada OK 0.500
Ley estandarizada 0.949
Ley media (Etype) 0.488
Varianza 0.000
Desviacion estandar 0.01

```

Visualizacion de las leyes de simulacion versus ley programada KO

```

1s [8] from scipy.stats import gaussian_kde as gauss
plt.figure(dpi=100,figsize=(10,5))
x = np.linspace(1,25,num=ndata)
y = data[:,0]

#Calculo densidad de puntos
xy = np.vstack([x,y])
z = gauss(xy)(xy)

plt.scatter(x,y, c=z, s=100, label='leyes')
plt.plot([0,ndata],[ley_ok,ley_ok], 'r-.')
plt.text(ndata,ley_ok,'Ley del plan OK')
plt.plot([0,ndata],[E_type,E_type], 'b-.')
plt.text(ndata,E_type,'Ley E_type')
plt.axis([0,25,0.30,0.65])
plt.title('Leyes de simulacion vs KO')
plt.ylabel('Ley Au (g/t)')
plt.xlabel('Simulaciones')
plt.legend(loc='lower right')
plt.grid()
plt.savefig("Leyes de simulacion vs KO.png",bbox_inches="tight", dpi=300)

```

Distribucion normal gaussiana

```
✓ [9] mu,sigma = E_type, desv #media y desviacion estandar
0s s = np.random.normal(mu,sigma,1000) #creando muestras de datos

plt.figure(dpi=100,figsize=(5,5))
yy,xx, ignorar = plt.hist(s,20,color='silver', density= True, histtype='bar', edgecolor='gray')
plt.plot(xx,1/(sigma*np.sqrt(2*np.pi))*np.exp(-(xx-mu)**2/(2*sigma**2)),linewidth=2,color='r')
plt.title('Histograma de distribucion')
plt.ylabel('Funcion de densidad')
plt.xlabel('Ley Au')
plt.show()
```

```
✓ [10] import scipy.stats as ss
0s d,pvalor=ss.kstest(y,"norm",args=(E_type,desv))
#confianza al 99%, Kolmogorov-Smirnov test, el nivel de significancia es 1-nivel de confianza/100

if pvalor < 0.01:
    print("No se ajusta a una normal, pvalor: ", "{0:.3f}".format(pvalor))
else:
    print("Se puede ajustar a una normal, pvalor: ", "{0:.3f}".format(pvalor))

#Si la muestra se puede ajustar a la normalidad, se acepta la hipotesis de partida, de lo contrario
#No se confirma si presenta una distribucion normal

Se puede ajustar a una normal, pvalor: 0.200
```

Transformacion a valores normalizados (0,1)

```
✓ [11] def nscore(x):#normalizacion de los datos mu, sigma = 0,1
0s k = np.argsort(np.argsort(x))
n = len(x)
q = norm.ppf(np.linspace(0.5/n,1-0.5/n,n))
return q[k]
z = nscore(y)
```

```
1s mu, sigma = 0,1
#parametros de distribucion normal

plt.figure(dpi=100, figsize=(5,5))
plt.hist(z,10,color='silver', label='Au', density=True, edgecolor='gray',cumulative=None)
k = z[np.argsort(z)]

#ordenamiento de datos
plt.plot(k,1/(sigma*np.sqrt(2*np.pi))*np.exp(-(k-mu)**2/(2*sigma**2)),linewidth=2, color='r')
plt.plot([ley_ok_dsv,ley_ok_dsv],[0,0.4], 'b-.')
plt.text(ley_ok_dsv,0.1,'Ley Au OK')
plt.plot([0,0],[0,0.4], 'r-.')
plt.text(0,0.1, 'E_type')
plt.legend(loc="upper left")
plt.title('Histograma de distribucion leyes simuladas normalizadas')
plt.xlabel('Ley Au (g/t) normalizado')
plt.ylabel('Probabilidad')
plt.savefig("Histograma de distribucion leyes simuladas normalizadas.png",bbox_inches='tight',dpi=300)
plt.show()
```

Probabilidad de cumplimiento

```
✓ [19] prob_ley = norm.cdf(ley_ok_dsv,0,1)
0s     print('Probabilidad que la ley del pit 0.50 g/t Au sea menor, es',"{0:.2f}".format(prob_ley))
     print('Probabilidad que la ley del pit 0.50 g/t Au sea mayor, es',"{0:.2f}".format(1-prob_ley))
```

```
Probabilidad que la ley del pit 0.50 g/t Au sea menor, es 0.83
Probabilidad que la ley del pit 0.50 g/t Au sea mayor, es 0.17
```

Fin de analisis

Fuente: Elaboración propia.