

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



“CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS DE MINAS EN SUPERFICIE MEDIANTE VISUALIZACIÓN SATELITAL”

JAVIER IGNACIO ÁLVAREZ GÁLVEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía: Manuel Reyes
Profesor Patrocinante: Gonzalo Nelis
Profesor Coreferente: Nicolás Torres

Septiembre - 2023

DEDICATORIA

Para mi mamá y papá.

AGRADECIMIENTOS

Si lees esto es porque probablemente influiste en el desarrollo de este trabajo, te lo agradezco.

RESUMEN

Los parámetros geométricos desempeñan un papel fundamental en el diseño de minas a cielo abierto, ya que abarcan aspectos cruciales como la configuración de bancos, ángulos, rampas, y switchbacks, entre otros. Estos elementos son esenciales para la operación minera y la eficiencia de la extracción de recursos. Es importante destacar que, en la actualidad, el diseño de estos parámetros geométricos en las minas chilenas se basa principalmente en el criterio individual de los planificadores mineros, sin adherirse a estándares nacionales o internacionales.

En este contexto, esta investigación tiene como objetivo evaluar de manera estandarizada la configuración de los parámetros geométricos en las minas a cielo abierto en Chile. Para ello, se utilizó el software Google Earth Pro para obtener imágenes satelitales de las minas, lo que permitió una representación fiel de sus diseños geométricos. Se identificaron las variables más influyentes en el diseño de estas minas superficiales y se construyó una base de datos que abarcara una amplia variedad de estilos de diseño de rajos, parametrizados en función de estas variables. Posteriormente, se aplicaron técnicas de Machine Learning para segmentar y agrupar los diferentes tipos de rajos en base a las variables involucradas.

Los resultados de esta investigación revelaron diferencias significativas entre los diseños de los parámetros geométricos de las minas estudiadas. Estas variaciones son evidentes y demuestran que las decisiones de diseño tienen un impacto notable en la configuración de las minas. En consecuencia, se destaca la necesidad de desarrollar una guía o metodología clara para los planificadores mineros que les facilite la toma de decisiones en este aspecto.

En última instancia, se recomienda aprovechar la metodología desarrollada en esta investigación para crear un enfoque más robusto que permita medir los parámetros geométricos de las minas utilizando la inteligencia artificial y la visualización satelital. Esto podría agilizar significativamente el proceso de medición, aportando eficiencia en términos de tiempo y recursos.

Palabras Claves— Minas a cielo abierto, imágenes satelitales, parámetros geométricos, K-Means, diseño de mina

ABSTRACT

Geometric parameters play a fundamental role in the design of open-pit mines, encompassing crucial aspects such as bench configuration, angles, ramps, and switchbacks, among others. These elements are essential for mining operations and the efficiency of resource extraction. It is noteworthy that, at present, the design of these geometric parameters in Chilean mines is primarily based on the individual criteria of mining planners, without adherence to national or international standards.

In this context, this research aims to assess the configuration of geometric parameters in Chilean open-pit mines in a standardized manner. To achieve this, Google Earth Pro software was used to obtain satellite images of the mines, providing a faithful representation of their geometric designs. The most influential variables in the design of these surface mines were identified, and a database was constructed to encompass a wide variety of rajo design styles, parametrized based on these variables. Subsequently, Machine Learning techniques were applied to segment and group different types of rajos based on the involved variables.

The results of this research revealed significant differences between the designs of geometric parameters in the studied mines. These variations are evident and demonstrate that design decisions have a notable impact on mine configuration. Consequently, there is a highlighted need to develop a clear guide or methodology for mining planners to facilitate decision-making in this aspect.

Ultimately, it is recommended to leverage the methodology developed in this research to create a more robust approach that allows for the measurement of mine geometric parameters using artificial intelligence and satellite visualization. This could significantly streamline the measurement process, providing efficiency in terms of time and resources.

Keywords— Open-pit mines, satellite imagery, geometric parameters, K-Means, mine design

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Alcances	2
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES	4
2.1 Diseño de Minas a Cielo Abierto	4
2.1.1 Parámetros geométricos en el diseño de una mina a cielo abierto	4
2.2 Inteligencia Artificial (IA)	11
2.2.1 Clustering	11
2.2.2 K-Means	12
2.2.3 Validación de Cluster	14
2.2.4 Imputación de datos	15
2.3 Aplicaciones de Clustering en Minería	17
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	20
3.1 Generación de base de datos	20
3.2 Análisis y generación de Clusters	23
3.2.1 Análisis exploratorio de datos	23
3.2.2 Imputación de datos	23
3.2.3 K-Means	24
3.2.4 Validación de Cluster	24
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	25
4.1 Análisis exploratorio de Datos	25
4.1.1 Área	25
4.1.2 Volumen	26
4.1.3 Ángulo global	27
4.1.4 Longitud del talud global	28
4.1.5 Producción anual	29
4.1.6 Cantidad de switchbacks	31
4.1.7 Desprendimiento de talud	32
4.2 Resultados de cluster	34
4.3 Validación del modelo	36

4.4 Análisis	38
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	42
ANEXOS	44
6 Anexo A: Obtención de parámetros geométricos en Software Google Earth Pro . . .	44
7 Anexo B: Detalle de Análisis Exploratorio de Datos de los parámetros geométricos restantes	64
7.0.1 Longitud de rajo	64
7.0.2 Ancho de rajo	65
7.0.3 Razón elíptica	66
7.0.4 Elevación pie	67
7.0.5 Elevación cresta	67
7.0.6 Perímetro	68
7.0.7 Ancho de rampa	69
7.0.8 Longitud de rampa	70
7.0.9 Altura de banco	71
7.0.10 Profundidad	72
7.0.11 Cantidad de bancos	73
7.0.12 Forma	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Bancos Mina Chuquicamata	5
2	Elementos de un banco	5
3	Ángulo de talud	6
4	Ángulo de talud global	6
5	Ángulo interrampa	7
6	Ángulo con rampa incluída	7
7	Curva en U en rampa	8
8	Switchbacks	9
9	A. Mina Collahuasi	10
10	B. Mina Chuquicamata	10
11	Agrupamiento por K-Means	13
12	Método del Codo	13
13	Parámetro geométrico - Área	26
14	Parámetro geométrico - Volumen	27
15	Parámetro geométrico - Ángulo global	28
16	Parámetro geométrico - Longitud talud global	29
17	Producción total de cobre fino en toneladas en el año 2020	30
18	Producción total en toneladas en el año 2020 con imputación de datos	31
19	Parámetro geométrico - Cantidad de switchbacks	32
20	Parámetro geométrico - Desprendimiento de talud	33
21	Matriz de correlación	34
22	Resultado del Método del codo	35
23	Validación mediante Coeficiente de Silueta	37

24	Dendograma	37
25	Validación mediante Coeficiente de Silueta en Clustering Jerárquico	38
26	Medición de Longitud de rajo	44
27	Medición de Ancho de rajo	45
28	Medición de Elevación pie	46
29	Medición de Elevación cresta	47
30	Medición de Perímetro y Área	48
31	Medición de Longitud de talud global	49
32	Medición de Ancho de rampa	50
33	Medición de Longitud de rampa	51
34	Medición de Altura de banco	52
35	Medición de Desprendimiento de talud	53
36	Medición de Desprendimiento de talud Categoría 1	54
37	Medición de Desprendimiento de talud Categoría 2	55
38	Medición de Desprendimiento de talud Categoría 3	56
39	Medición de Desprendimiento de talud Categoría 4	57
40	Medición de Desprendimiento de talud Categoría 5	58
41	Medición de Forma Categoría 1	59
42	Medición de Forma Categoría 2	60
43	Medición de Forma Categoría 3	61
44	Medición de Forma Categoría 4	62
45	Medición de Forma Categoría 5	63
46	Parámetro geométrico - Longitud de rajo	65
47	Parámetro geométrico - Ancho de rajo	66

48	Parámetro geométrico - Razón elíptica	66
49	Parámetro geométrico - Elevación pie	67
50	Parámetro geométrico - Elevación cresta	68
51	Parámetro geométrico - Perímetro	69
52	Parámetro geométrico - Ancho de rampa	70
53	Parámetro geométrico - Longitud de rampa	71
54	Parámetro geométrico - Altura de banco	72
55	Parámetro geométrico - Profundidad	73
56	Parámetro geométrico - Cantidad de bancos	74
57	Parámetro geométrico - Forma	75

ÍNDICE DE TABLAS

1	Estadísticas básicas	30
2	Media de cada variable en función de cada cluster hecho por K-Means.	36
3	Resumen de estadísticas descriptivas de los parámetros geométricos	64

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Chile se ha consolidado como uno de los mayores productores de cobre a nivel mundial, alcanzando una producción equivalente a 5,35 millones de toneladas para el año 2022 [COCHILCO, 2022], aun cuando solo posee el 0,6 % de la superficie terrestre a nivel global. Una explicación de ello es la abundancia de recursos naturales presentes en la corteza terrestre, el cual constituye el 30 % de las reservas y recursos en el mundo [SONAMI, 2012]. Otro motivo relevante es la institucionalidad que garantiza estabilidad al inversor, tanto en lo político, como en lo económico y jurídico [SONAMI, 2012]. Por último, un factor ponderante es el nivel de coordinación que se ha logrado en general en la planificación minera.

En particular, la planificación en la industria extractiva minera es un proceso clave ya que se definen aspectos como las reservas por extraer, capacidad de producción de mineral enviado a planta y la vida útil de la mina. A partir de la consolidación de estos, se entrega un plan de producción de la cantidad de mineral y estéril a remover desde la mina [Alfaro, 2009].

Este proceso -en el caso de la minería a cielo abierto- conlleva las siguientes etapas: valorización del modelo de bloques, cálculo de una envolvente económica, secuencia de explotación, selección de equipos, programa de producción, análisis económico y diseño de la mina. Este último consiste en incorporar todo lo relacionado a parámetros económicos, geométricos, geomecánicos, operativos y medioambientales propios de la mina [Recalde, 2007].

En general, estos parámetros son fundamentales para lograr un funcionamiento adecuado a nivel operacional, ambiental y de seguridad. Por ello, es fundamental que se establezca un marco normativo en esta materia, ya que entrega confiabilidad para garantizar el cumplimiento de normativas ambientales; permite contar con un plan de producción eficiente para la operación; asegura la estabilidad geomecánica en el rajo; mantiene un control y previsión de la calidad de los minerales; y, en suma, afianza la rentabilidad del negocio propio de la empresa minera [Recalde, 2007].

De allí radica la importancia de que la empresa minera, una vez operativa, realice un monitoreo y seguimiento del estado de estos parámetros. Sin embargo, en la práctica este levantamiento de datos es un proceso bastante complejo ya que no está definido un método estandarizado para aquello, por lo que tomar mediciones implica una inversión de tiempo importante.

En consecuencia, se pierde la eficiencia en el proceso de obtener información respecto a las variables que componen el parámetro geométrico y geomecánico, como lo son el banco; altura del banco; talud del banco; talud de trabajo; caminos; rampas de acceso; límites finales de la mina; longitud de caminos; inclinación de caminos; switchbacks; pushbacks; fondo pit; caminos alternativos al fondo del pit; entre otros [Hustrulid *et al.*, 2013]. Sumado a ello, se presenta como antecedente que el diseño en terreno de estos elementos no poseen un

marco regulatorio que dictamine, en estricto rigor, cómo se deberían diseñar, por lo que son elaborados bajo el criterio arbitrario del planificador a cargo de la mina a cielo abierto. Por lo tanto, si bien, anteriormente se ha mencionado que un factor clave es la planificación minera al contribuir en obtener un destacado nivel de producción nacional respecto a los demás países; no obstante, estos antecedentes evidencian que esta es un área que aún requiere ser intervenida, para así no perjudicar el liderazgo que posee el país en el rubro.

Por lo tanto, ante esta problemática, se caracterizará el diseño de minas en superficie, con el fin de conocer los efectos que ha tenido la forma en la que actualmente se decide la configuración de los parámetros geométricos de las minas a cielo abierto. Para ello, se utilizará como herramienta de apoyo las imágenes satelitales, con el objetivo de obtener los parámetros geométricos de los diferentes diseños de minas a cielo abierto, y definir, en base a los hallazgos obtenidos, los tipos de diseños que existen con el apoyo de la herramienta de Inteligencia Artificial denominada Clustering.

Finalmente, se espera que en un futuro este levantamiento de información de los tipos de diseño de minas a cielo abierto permita sentar las bases para el desarrollo de un método automatizado en la obtención de datos con el apoyo de imágenes satelitales.

1.1. Objetivo General

- Elaborar una clasificación de diseño de minas a cielo abierto a partir de los parámetros geométricos obtenidos por imágenes satelitales.

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar variables influyentes que estén vinculadas en el diseño de minas de superficie observadas en imágenes satelitales.
- Levantar una base de datos con los diferentes estilos de diseño de rajo de forma parametrizada.
- Elaborar una segmentación de los tipos de rajo en base a las variables involucradas.

1.3. Alcances

La presente investigación se enmarca bajo ciertos alcances, precisados a continuación:

1. Las imágenes satelitales serán observadas solo en Chile.

2. Las imágenes observadas serán para proyectos únicamente *Brownfield*.
3. Se aplicará una evaluación primordialmente cualitativa, definiendo fortalezas y debilidades de los parámetros geométricos de cada diseño de mina.
4. Debido a la naturaleza de las imágenes satelitales, se observarán solo diseño de minas en superficie.
5. No se mencionarán parámetros económicos, sociales, ambientales, geotécnicos, sino que solo de diseño y estructural.
6. Cada imagen tendrá un cierto margen de error con respecto a la realidad debido a la precisión de los satélites ocupados en el software Google Earth Pro.
7. Se trabajará con un universo de 30 minas a lo largo de todo Chile.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1. Diseño de Minas a Cielo Abierto

Las minas a cielo abierto son un tipo de método de explotación minera, en donde se extraen yacimientos de minerales diseminados en grandes volúmenes de roca [Alier, 2015], teniendo una participación cercana al 81 % en nuestro país, con respecto a la producción total de cobre [COCHILCO, 2023]. Para su operación, es fundamental tener presente los siguientes parámetros: económicos, geométricos, geomecánicos, operativos y medioambientales. En concreto, cada uno de ellos involucran los siguientes aspectos de la mina:

1. **Económico:** Enfocados en términos de vida útil y rentabilidad propia de la mina.
2. **Geotécnicos:** Dependientes en función de la estructura y morfología del yacimiento, pendientes del terreno, límites de propiedad, etc.
3. **Operativos:** Dimensiones necesarias de los equipos mina para que la maquinaria empleada trabaje en condiciones adecuadas de eficiencia y seguridad en torno a los parámetros geométricos establecidos por la mina [Chebair y Yanes, 2020].
4. **Medioambientales:** Aquellos que permiten la restauración de los terrenos afectados, la reducción de ciertos impactos ambientales y la no interferencia con la calidad del aire y aguas subterráneas y superficiales [Chebair y Yanes, 2020].
5. **Geométrico:** Relacionados al diseño de la mina como el tamaño, talud, inclinación de caminos, altura de banco, etc. [González, 2021].

En el caso de los parámetros geométricos, se requiere de una planificación minera adecuada para que las maquinarias al interior de la mina operen exitosamente, de tal manera que ejecuten el plan minero de forma oportuna. Así, se evitan accidentes con otros equipos y/o con personas y, por consiguiente, se optimiza la producción conjunta de la mina. Por lo tanto, es relevante que el encargado de la planificación minera trabaje y coordine en detalle estos parámetros y, para ello, debe tener presente los diferentes ángulos, bancos y caminos y/o rampas presentes dentro de la mina a cielo abierto.

2.1.1. Parámetros geométricos en el diseño de una mina a cielo abierto

El parámetro geométrico está compuesto por los siguientes elementos:

■ Bancos

1. **Banco (Figura 1 y 2):** Es el elemento esencial del talud y es comprendido como una unidad básica de explotación en una mina a cielo abierto. A medida que se avanza con la extracción, se va formando un escalón, el cual une dos niveles que constituyen la rebanada o nivel, que se explota de estéril o mineral [Chebair y Yanes, 2020].



Figura 1: Bancos Mina Chuquicamata
Fuente: Elaboración propia

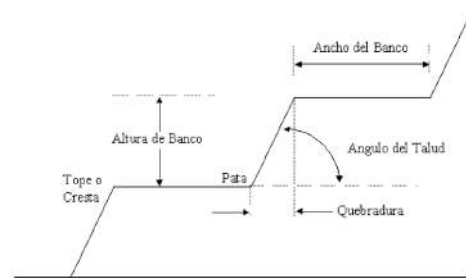


Figura 2: Elementos de un banco
Fuente: [Chebair y Yanes, 2020]

2. **Altura de banco:** Este valor lo estima el planificador minero a partir de las características físicas y morfológicas del yacimiento, tamaño de los equipos mineros, climatología y la selectividad que posee. Por lo general, para yacimientos de mediana envergadura, el valor de la altura de banco ronda los 15 metros de longitud [Jimenez del Valle, 2014].
3. **Ancho de berma:** Corresponde a la distancia entre el tope de la cresta del banco inferior con el pie del banco superior. Su funcionalidad radica en retener y/o contener el material desprendido de cotas topográficas superiores [Moreno, 2019].

■ Ángulos

1. **Ángulos de talud (Figura 3):** Es el ángulo formado entre una horizontal y la línea que conecta el fondo ('pata') con el borde superior ('tope') de una excavación desarrollada en la corteza terrestre [Chebair y Yanes, 2020]. Su valor dependerá del planificador, del ángulo interrampa, número de *catch-berms* y el sistema de rampas. Típicamente el valor oscila los 35° y 48° [Moreno, 2019].

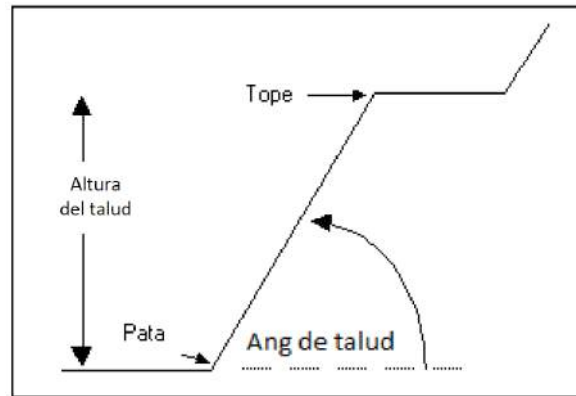


Figura 3: Ángulo de talud
Fuente: [Chebair y Yanes, 2020]

Este parámetro es respecto a un talud, además se define el ángulo de talud global de la mina, el cual comprende el ángulo total desde el fondo hasta el borde superior de la superficie topográfica del rajo (Figura 4).



Figura 4: Ángulo de talud global
Fuente: [Díaz Pizarro, 2017]

2. **Ángulo Interrampa (Figura 5):** Se define como el ángulo medido entre el banco inferior hasta la cresta de la rampa superior [Díaz Pizarro, 2017].

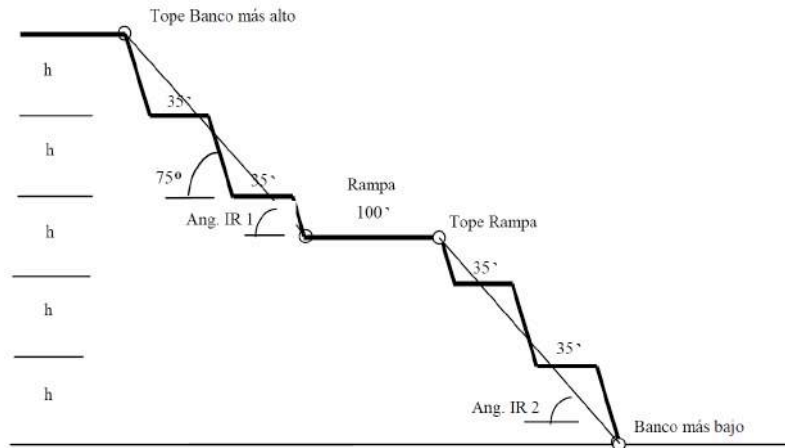


Figura 5: Ángulo interrampa
Fuente: [Chebair y Yanes, 2020]

3. **Ángulo con rampa incluída (Figura 6):** Es el ángulo medido entre el pie de un banco hasta el tope de un banco más alto incluyendo la rampa.

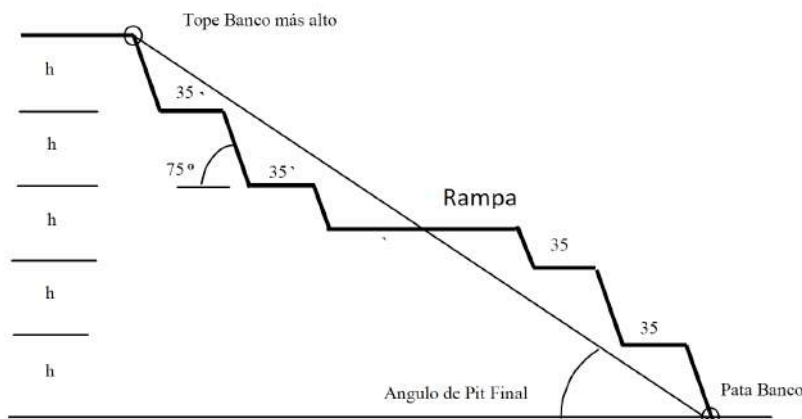


Figura 6: Ángulo con rampa incluída
Fuente: [Chebair y Yanes, 2020]

■ Caminos mineros y/o rampas

1. **Rampas:** Es el ancho útil de la labor por la que transitan vehículos mecanizados tales como cargadores, equipos LHD, entre otros. Se debe dejar un espacio mínimo de 0,5 metros a cada costado del equipo, considerando el vehículo más ancho que transite por la labor y desde la parte más elevada de la cabina hasta el techo de la labor [MINMINERIA, 2022].

Este valor se puede estimar mediante la siguiente Ec. (1):

$$A(\text{Anchocamino}) = a(0,5 + 1,5n) \quad (1)$$

En donde: A = Ancho total de la pista (m); a = Ancho del vehículo (m); n = Número de pistas deseadas.

Por lo tanto, en el lado izquierdo como en el derecho de cada vehículo debe dejarse una separación equivalente a la mitad de la anchura de este [Chebair y Yanes, 2020].

2. **Radio y sobreancho en las curvas (Figura 7):** Las curvas son los puntos con mayor riesgo para los vehículos mineros, sobre todo si son parte de caminos de doble vía. Por ello, al interior de este tipo de mina las curvas son cerradas con formas de U, aunque en ningún caso se debe suponer que las curvas puedan significar disminución de la velocidad de cada equipo minero, por lo que se debe construir cada radio de curva y peralte acorde a las dimensiones de los vehículos de la mina. Además, siempre se realiza un sobreancho en cada curva debido a que, en curva, los camiones mineros ocupan una anchura mayor que en recta. Esto sucede ya que las ruedas traseras de los camiones no siguen exactamente la trayectoria de las ruedas delanteras por la rigidez del chasis [Chebair y Yanes, 2020].



Figura 7: Curva en U en rampa
Fuente: [Chebair y Yanes, 2020]

3. **Peralte:** Se construye para contrarrestar la fuerza centrífuga que afecta a los equipos mineros que transitan en una curva, el cual provoca en ocasiones deslizamientos transversales e incluso vuelcos.
4. **Pendiente de la rampa:** Este valor dependerá de las características mecánicas y técnicas de cada equipo minero que circule por las rampas en pendientes. Una pendiente muy pronunciada puede causar problemas en las maquinarias, por lo tanto, un rango seguro para diseñar es entre 8 % y 10 % de gradiente [Moreno, 2019].
5. **Switchbacks (Figura 8):** En español, *switchback* significa el cambio de sentido en el camino, implicando los radios más pronunciados para las rampas [González, 2021]. En particular, al diseñar estos caminos se tienen varias opciones, las que según [Hustrulid et al., 2013], pueden ser tres:
 - a) En forma de espiral alrededor del rajo.

- b) Con cierta cantidad de *switchbacks* a un lado del rajo.
- c) Una combinación de ambas.

Su uso tiene aspectos negativos y positivos. Por un lado, no se recomienda utilizarlos debido a que disminuye la velocidad de tránsito, provoca mayor desgaste en los neumáticos de los camiones mineros y la seguridad se ve afectada en términos de visibilidad del conductor. Sin embargo, por otro lado, se considera óptimo su uso en caso que exista un cuerpo mineralizado con un ángulo de inclinación suave, lo que en definitiva permite realizar una extracción con los *switchbacks* a un bajo costo y alta rentabilidad. Por lo tanto, según la prioridades que se tengan presentes, es que la mina lo utilizará o no.

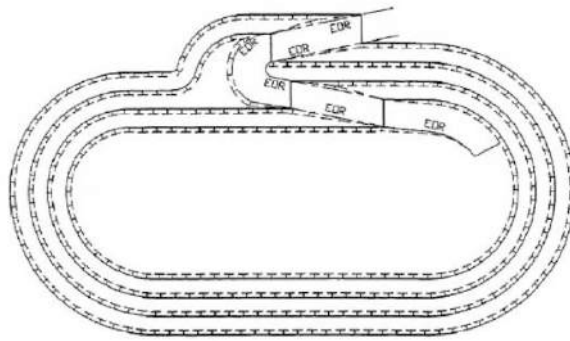


Figura 8: Switchbacks
Fuente: [Hustrulid *et al.*, 2013]

En resumen, estas son las variables que componen el parámetro geométrico del diseño de una mina a cielo abierto, las cuales se diseñan y configuran de acuerdo al criterio de cada planificador minero, pues en base a su experiencia, es que determina lo que considere óptimo para la labor minera. En ese sentido, es que bajo este criterio de toma de decisión, se da el espacio para que cada diseño de mina a cielo abierto se configure de manera subjetiva, es decir, sin una estructura o alineamientos en común, al ser elaborado a partir de un criterio personal del profesional.

Por ejemplo, si se observan las siguientes dos imágenes satelitales obtenidas mediante el software Google Earth Pro, es posible advertir que el hecho de que cada planificador utilice un criterio propio, efectivamente se traduce en que sus diseños sean diferentes entre sí. Cabe destacar que la resolución de las imágenes es de 1920x1080 (1080 HD), la precisión y la tasa de reconocimiento es de 4,38 metros y 71,8 % respectivamente. Por lo tanto, estas especificaciones permiten que este caso de comparación sea válido al ser imágenes con buena precisión y de buena calidad [Wang y Wang, 2020].



Figura 9: A. Mina Collahuasi
Fuente: Elaboración propia



Figura 10: B. Mina Chuquicamata
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en estas imágenes es posible visualizar diferencias en torno a parámetros superficiales tales como el área, longitud, ancho, forma, etc. En específico, en la Figura 9 se distingue que tiene una forma más circular, además de un ancho y longitud más pequeñas. En cambio, en la Figura 10 se observa que sus parámetros superficiales son más grandes que en la Figura 9, siendo su forma más elipsoidal que circular. Sin embargo, la cantidad de switchbacks que se pueden contabilizar en la Figura 9 son menores que en el caso de la Figura 10. Por lo tanto, este caso evidencia cómo este criterio de toma de decisión genera diferencias en el diseño de minas.

Ante este panorama, es que se utilizará la Inteligencia Artificial (en adelante, IA) como herramienta de apoyo en la identificación de estos en las minas a cielo abierto, de modo que levante los datos respecto a los parámetros geométricos de estos diseños. En concreto, se utilizará una rama en particular de la IA denominada Clustering, siendo el más adecuado para este tipo de enfoque. Cabe mencionar que es necesario comprender en detalle el campo de la IA, dado que cumple diversas funciones como la deducción, razonamiento, procesamiento del lenguaje, percepción, entre otros [Gajardo, 2021]. Por lo tanto, se definirá teóricamente lo que es la IA y, en particular, el clustering, para así delimitar estos conceptos en función de la presente investigación.

2.2. Inteligencia Artificial (IA)

La inteligencia artificial (IA) es un campo de la informática que se enfoca en la creación de sistemas capaces de ejecutar tareas que requieren de habilidades cognitivas humanas, tales como el aprendizaje, el razonamiento y la toma de decisiones. Esto se ha instalado como un apoyo esencial en las necesidades técnicas del ser humano, como en los casos de reconocimiento de imágenes estáticas, mantenimiento predictivo, detección y clasificación de objetos, entre otras [Gajardo, 2021].

A medida que la IA ha ido evolucionando, se han desarrollado diversas técnicas y algoritmos para resolver problemas complejos y aprovechar al máximo grandes volúmenes de datos [Russell y Norvig, 2016].

Uno de los subcampos más importantes de la IA es el aprendizaje automático, que se basa en instruir a las máquinas que aprendan a partir de ejemplos y experiencias pasadas. Dentro del aprendizaje automático, el clustering es una técnica fundamental que se utiliza para descubrir patrones y agrupaciones en conjuntos de datos no etiquetados [Bishop, 2006].

2.2.1. Clustering

Clustering, o también conocido como análisis de agrupamiento, es una técnica utilizada en diferentes áreas, entre ellas el campo de la minería de datos, en donde se aplica para identificar patrones y agrupaciones naturales en un conjunto de datos no etiquetados [Géron, 2019].

Su objetivo principal radica en dividir un conjunto de datos en grupos o *clusters*, de tal manera que cada partícula o elemento de los grupos tengan atributos similares entre sí, y diferentes con respecto a los otros grupos. En concreto, este proceso se basa en diferentes algoritmos que evalúan similitudes o disparidades entre los elementos del conjunto de datos y los agrupan en función de su proximidad. Estos algoritmos utilizan como insumo las características o atributos de los datos y generan particiones que optimizan algún criterio de similitud o separación [Géron, 2019].

Si bien existen diferentes tipos de clustering como K-Means, agrupamiento jerárquico, DBSCAN, etc.; no obstante, todas estas poseen un proceso bastante similar al ser ejecutados, consistiendo de las siguientes etapas [MacQueen, 1967]:

1. **Selección de atributos:** Se eligen las características relevantes o atributos que describen los datos, los cuales pueden ser numéricos, categóricos o incluso estructurales, según el tipo de datos analizados.
2. **Definición de la medida de similitud:** Se selecciona una medida de similitud o distancia adecuada para evaluar qué tan cerca o lejos están los elementos entre sí. Algunas

medidas comunes incluyen la distancia euclidiana, la distancia de Manhattan, la similitud del coseno, entre otras.

3. **Elección del algoritmo:** Se selecciona un algoritmo de clustering apropiado para el tipo de datos y el problema en cuestión. Algunos ejemplos más conocidos son el algoritmo K-Means, el algoritmo de agrupamiento jerárquico, el algoritmo DBSCAN, entre otros.
4. **Asignación de elementos a clusters:** El algoritmo asigna inicialmente los elementos a clusters de manera aleatoria o utilizando alguna estrategia inicial. Luego, en cada iteración, reasigna los elementos a los clusters de acuerdo con la medida de similitud definida.
5. **Evaluación y refinamiento:** Se evalúa la calidad de los clusters generados utilizando métricas específicas, como el índice de silueta o la suma de cuadrados intra-cluster. Si los resultados no son satisfactorios, se pueden ajustar los parámetros del algoritmo o probar diferentes técnicas hasta obtener una partición satisfactoria.

Cabe destacar que el clustering es una técnica exploratoria y no supervisada, lo que implica que no se basa en etiquetas o categorías predefinidas, sino que busca agrupaciones y estructuras emergentes de manera automática. Esto lo diferencia de otros enfoques de aprendizaje automático, como la clasificación, que requieren de datos etiquetados para entrenar un modelo predictivo [Géron, 2019].

Ahora bien, con respecto a la elección del algoritmo, para efectos de esta investigación se utiliza el algoritmo K-Means, el cual se explicará con mayor detalle en el siguiente apartado.

2.2.2. K-Means

Los algoritmos de aprendizaje automático se clasifican bajo dos clases: aprendizaje supervisado y no supervisado. La diferencia entre ambos es determinada por la presencia de la variable objetivo, siendo afirmativo para el caso del aprendizaje supervisado.

Al operar el aprendizaje no supervisado genera que las bases de datos tengan datos puntuales (filas), de los cuales cada uno de estos tendrá sus respectivos atributos (columnas) que los describirán. Dentro de este tipo de algoritmo, el agrupamiento más conocido es el K-Means, el cual es utilizado cuando se disponen de datos sin etiqueta, es decir, datos sin categorías o grupos definidos.

El K-Means sigue una forma sencilla de clasificar un conjunto de datos a través de un cierto número de clústeres, fijados a priori. Su funcionamiento radica en la iteración para asignar cada dato puntual a uno de los K grupos en función de la similitud de las características que tengan cada uno de ellos (Figura 11) [Banerjee, 2020].

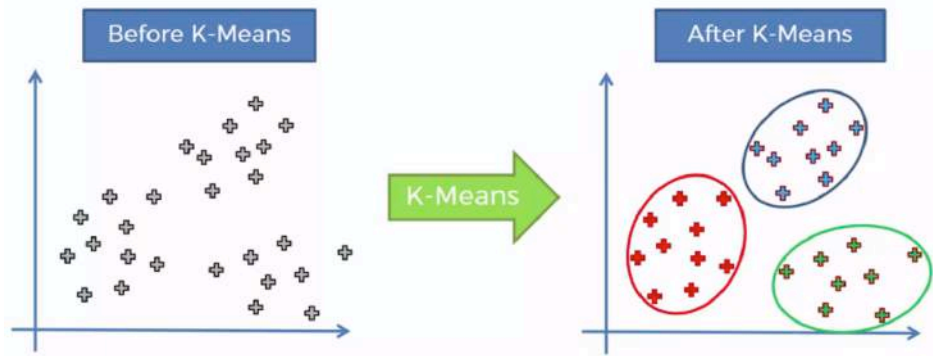


Figura 11: Agrupamiento por K-Means
Fuente: [Banerjee, 2020]

En concreto, el rendimiento de K-Means dependerá del valor de los K grupos que se le asigne. Por lo tanto, se debe escoger la cantidad satisfactoria de K que brinde el mejor rendimiento y, para ello, existen varias técnicas disponibles, siendo 'el método del codo' una de las formas más conocidas para encontrar el valor de K (Figura 12).

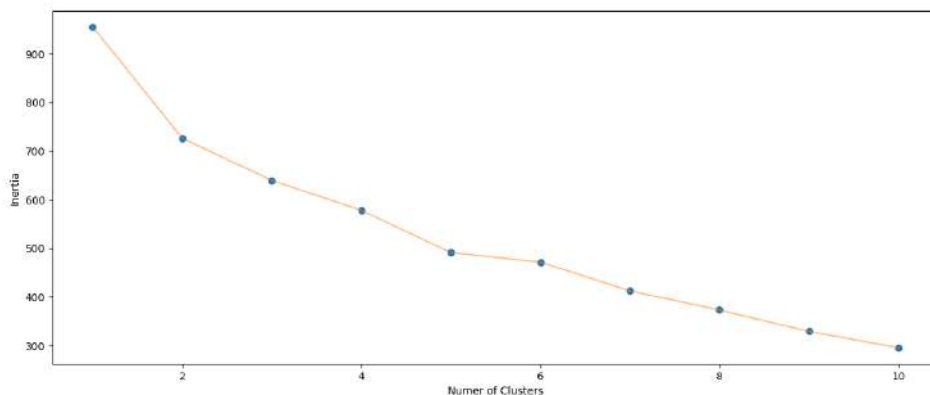


Figura 12: Método del Codo
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 12, se presentan dos ejes que indican la inercia y los números de clusters o grupos. El primero se refiere a la suma de las distancias cuadradas entre cada punto de datos y el centroide del grupo al que pertenece. En otras palabras, la inercia representa la medida de cuán dispersos están los puntos de cada grupo y, por lo tanto, indica cuantitativamente la calidad de agrupación. Por otro lado, el segundo eje indica la cantidad de grupos para formar.

El objetivo de este gráfico es encontrar el punto de la curva en donde se genere una disminución significativa en la inercia a medida que K aumenta, la cual representa la cantidad satisfactoria de clusters. Es allí donde este punto forma una curva similar a un codo, de ahí el nombre del método.

2.2.3. Validación de Cluster

En el caso de K-Means, la validación de cluster se utiliza para evaluar la calidad de los resultados del algoritmo de clustering. Este proceso es fundamental para evitar encontrar patrones en datos aleatorios, así como en situaciones en las que se desee comparar dos algoritmos de clustering. Según [Charrad *et al.*, 2014], la validación de clustering se puede categorizar en tres clases:

1. **Validación interna de cluster:** Utiliza la información interna del proceso de clustering para evaluar la calidad de una estructura de clustering, sin hacer referencia a información externa. Además, se puede utilizar para estimar el número de grupos y el algoritmo de agrupamiento más adecuado.
2. **Validación externa de cluster:** Consiste en comparar los resultados de un análisis de grupos con un resultado conocido externamente, como etiquetas de clase. Calcula en qué medida las etiquetas cluster coinciden con las etiquetas de clase suministradas externamente. Dado que se conoce el número 'exacto' de grupos de antemano, este enfoque se utiliza principalmente para seleccionar el algoritmo de clustering correcto para un conjunto de datos específicos.
3. **Validación relativa de cluster:** Evalúa la estructura de clustering al variar diferentes valores de parámetros para el mismo algoritmo (por ejemplo, variar el número de grupos definidos K). Esto se utiliza generalmente para determinar el número óptimo de grupos.

Cabe mencionar que, para efectos de esta investigación, se utilizará la validación interna de cluster debido a que proporciona más información cuantitativa que cualitativa.

Respecto a la validación interna, sus medidas reflejan a menudo tres parámetros característicos de la formación de cada cluster. Según [Charrad *et al.*, 2014] estos son:

1. **Cohesión:** Mide qué tan cercanos están los puntos dentro del mismo cluster.
2. **Separación:** Mide qué tan separado está un cluster de otros clusters.
3. **Conectividad:** Corresponde al grado en que los elementos se colocan en el mismo cluster que sus vecinos más cercanos en el espacio de datos.

Ahora bien, respecto a las métricas utilizadas para evaluar la dimensión de la calidad del agrupamiento [Ramírez, 2018], es posible destacar el Coeficiente de Silueta, el cual fue utilizado para efectos de esta investigación.

- **Coeficiente Silueta:** El Coeficiente Silueta valida si la agrupación de los clusters es la más adecuada, y estima la distancia promedio entre ellos [Charrad *et al.*, 2014]. Se dice que este coeficiente para X se calcula mediante la Ec. 2:

$$s(x) = \frac{b(x) - a(x)}{\max[a(x), b(x)]} \quad (2)$$

Donde: $a(x)$ es la distancia promedio de X a todos los demás puntos en el mismo cluster y $b(x)$ es la distancia promedio de X a todos los demás puntos en el cluster más cercano.

El coeficiente silueta $s(x)$ puede tomar un valor dentro del rango de -1 y 1 [Ramirez, 2018], en donde:

- -1 indica que es un mal agrupamiento.
- 0 indica que es indiferente.
- 1 indica que es un buen agrupamiento.

Y, por lo tanto, para todo el agrupamiento el coeficiente silueta se calcula mediante la Ec. 3:

$$s(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s(x)_i \quad (3)$$

2.2.4. Imputación de datos

La imputación de datos es un proceso fundamental en el análisis de datos, sobre todo cuando existen valores faltantes en una base de datos. En resumidas cuentas, consiste en estimar y reemplazar estos valores utilizando diferentes métodos. Uno de ellos es la imputación de datos mediante el K-vecino más cercano [Little y Rubin, 2019].

Este método se basa en la idea de que los registros con características similares tienden a tener valores semejantes para las variables faltantes. Esta técnica utiliza los valores de las variables no faltantes de los registros vecinos más cercanos para estimar los valores faltantes [Batista y Monard, 2003].

Algunas ventajas de la imputación de datos del K-vecino más cercano son:

1. No asume una distribución específica de los datos: A diferencia de otros métodos de imputación que requieren supuestos sobre la distribución de los datos, el KNN puede adaptarse a diferentes distribuciones de variables.

2. Conserva la estructura de los datos: Al utilizar registros cercanos para la imputación, el KNN preserva la estructura de los datos y mantiene las relaciones entre las variables.
3. Fácil implementación: El KNN es un método relativamente simple de implementar y entender. No requiere ajustar parámetros complicados o levantar supuestos complejos.

Sin embargo, también existen algunas debilidades asociadas este tipo de imputación, dentro de las cuales se pueden mencionar las siguientes:

1. Sensibilidad a la elección del número de vecinos (K): La elección del número de vecinos puede afectar la precisión de la imputación. Un valor demasiado pequeño puede resultar en una imputación sesgada, mientras que un valor demasiado grande puede diluir las características distintivas de los registros vecinos.
2. Puede generar imputaciones determinísticas: Dado que el KNN utiliza los valores de los vecinos más cercanos, la imputación resultante puede ser determinística y no reflejar completamente la incertidumbre asociada a los valores faltantes.
3. Sensible a la escala y correlación de las variables: El KNN se basa en la distancia entre registros, por lo que es importante tener en cuenta la escala de las variables y la correlación entre ellas. Variables con escalas muy diferentes o alta correlación pueden afectar la calidad de la imputación.

En síntesis, considerando los antecedentes teóricos presentados en este apartado, es relevante que se les sitúe bajo el campo de la minería, para entender como se da en la práctica en esta área. Para ello, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura actual, abarcando investigaciones relacionadas con el campo de la inteligencia artificial y su aplicación en la minería. Por consiguiente, en el siguiente apartado se presentan diversos estudios realizados por diferentes autores que han aplicado estas técnicas de agrupamiento en el ámbito minero.

2.3. Aplicaciones de Clustering en Minería

En el ámbito de la industria minera, se han realizado estudios levantados por diversos investigadores que han empleado la técnica del Clustering como herramienta de análisis. A continuación, se presentará una síntesis de algunos artículos científicos relacionados a la implementación de IA en el rubro minero.

1. [Salman *et al.*, 2021]: El artículo presenta un nuevo método de agrupamiento de bloques para la planificación a corto plazo de minas a cielo abierto. Este método utiliza enfoques de agrupamiento para agrupar bloques similares en función de sus atributos, como los grados geoquímicos y los tipos de roca, mientras cumple con diversas restricciones relacionadas con la forma, el tamaño, la alineación con la dirección de la explotación minera, el destino y la homogeneidad de los tipos de roca. El algoritmo propuesto demuestra su eficiencia y capacidad para generar grupos de bloques razonables que cumplen con diferentes requisitos y restricciones de agregación predefinidos, a través de su aplicación en dos conjuntos de datos diferentes.
2. [Kumar *et al.*, 2020]: En este artículo los autores proponen un nuevo marco de actualización continua para adaptar las decisiones de producción a corto plazo en un complejo minero. En particular, utilizan tecnologías digitales y algoritmos de aprendizaje para actualizar los modelos de incertidumbre de los componentes del complejo y adaptar el flujo de materiales en función de la información entrante. Aplicaron este marco a un complejo minero de cobre y demostraron que mejora los objetivos de producción y el flujo de efectivo en comparación con enfoques estándar de la industria.
3. [Kumar y Dimitrakopoulos, 2021]: En esta investigación, los autores desarrollaron un algoritmo de inteligencia artificial basado en aprendizaje profundo y búsqueda de árbol para adaptar la programación de producción a corto plazo en complejos mineros industriales. El algoritmo utiliza información en tiempo real para ajustar la secuencia de extracción, destino de los materiales y utilización de los flujos de procesamiento. Mediante el uso de una combinación de aprendizaje automático y búsqueda de árbol, el algoritmo aprende de su propia experiencia y mejora su capacidad de adaptación. Se aplicó el algoritmo a un complejo minero de cobre real, logrando una programación de producción a corto plazo altamente adaptativa que cumplía con los requisitos de producción y maximizaba la producción de concentrado de cobre y los flujos de efectivo en comparación con la programación inicial.
4. [Carver y Weiss, 2013]: En este estudio los autores comparan diferentes técnicas de agrupamiento (clustering) para el mapeo de la prospectividad mineral. En concreto, se evaluó la eficacia de diversas técnicas de agrupamiento en la identificación de áreas con alto potencial de recursos minerales, utilizando datos geológicos y geoquímicos. El objetivo era determinar qué método de agrupamiento era más adecuado para la identificación de áreas prospectivas.

5. [Ataei y Osanloo, 2016]: Los autores aplican técnicas de agrupamiento para evaluar el potencial mineral de un área en Zanja, Irán. Utilizando datos geológicos y geoquímicos, llevaron a cabo un análisis de agrupamiento para identificar patrones y relaciones entre las muestras de mineral. El objetivo era determinar las áreas con mayor potencial para la exploración y explotación de recursos minerales.
6. [Wang *et al.*, 2017]: Se aplica un análisis de agrupamiento para la clasificación de recursos minerales. Los autores utilizaron datos de perforación y muestreo para agrupar las muestras de mineral en categorías homogéneas. El objetivo era mejorar la precisión y eficiencia de la clasificación de recursos minerales mediante el uso de técnicas de agrupamiento.
7. [Saavedra *et al.*, 2018]: En este artículo los autores realizan un análisis de clusters para el modelado geológico y la estimación de recursos en un yacimiento de carbón. Utilizando datos geológicos y geofísicos, aplicaron técnicas de agrupamiento para identificar diferentes unidades geológicas y estimar los volúmenes de recursos en cada unidad. El objetivo era mejorar la precisión de la modelización geológica y la estimación de recursos en el yacimiento de carbón.
8. [Ayatollahi *et al.*, 2019]: Se propone un método basado en agrupamiento para la programación de la producción minera, utilizando técnicas de agrupamiento para agrupar los bloques de mineral según sus características y restricciones operativas. Luego, desarrollaron un algoritmo de optimización para generar un plan de producción eficiente y factible. El objetivo era mejorar la planificación y programación de la producción en las operaciones mineras.
9. [Yang *et al.*, 2020]: En este estudio, los autores aplicaron técnicas de agrupamiento para la estimación de las leyes en un yacimiento de mineral de hierro. Utilizando datos de muestreo y análisis de laboratorio, llevaron a cabo un análisis de agrupamiento para identificar patrones y tendencias en los datos de leyes del mineral. El objetivo era mejorar la precisión de la estimación de las leyes y facilitar la toma de decisiones en la explotación del yacimiento.
10. [Gholinejad *et al.*, 2021]: En este artículo, los autores aplicaron análisis de agrupamiento para el diseño óptimo de voladuras en minería a cielo abierto. Utilizando datos geotécnicos y de voladura, llevaron a cabo un análisis de agrupamiento para identificar patrones en los datos y optimizar los parámetros de diseño de las voladuras. El objetivo era mejorar la eficiencia y la seguridad de las operaciones de voladura en la minería a cielo abierto.
11. [Hu *et al.*, 2022]: En este artículo, los autores aplicaron algoritmos de agrupamiento para la exploración minera. Utilizando datos geológicos y geoquímicos, llevaron a cabo un análisis de agrupamiento para identificar patrones y anomalías en los datos y mejorar la identificación de áreas con potencial minero. El objetivo era mejorar la eficacia y la eficiencia de la exploración de recursos minerales mediante el uso de técnicas de agrupamiento.

En definitiva, es posible afirmar que la herramienta de Clustering ha desempeñado un papel fundamental en la industria minera al proporcionar implementos analíticos que ayudan a comprender y optimizar las operaciones mineras, lo que contribuye a una gestión más eficiente y rentable de los recursos minerales. Por lo tanto, de acuerdo al gran aporte que realiza, es que se considera el uso de esta herramienta para la presente investigación.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Esta sección presenta por etapas la metodología empleada en esta investigación. En primer lugar, se llevó a cabo la generación de una base de datos de los parámetros geométricos en el diseño de una mina a cielo abierto, que servirá como fuente de información primordial para el análisis. Posteriormente, se realizó una minería de datos sobre esta base de datos, con el propósito de identificar patrones, tendencias y relaciones relevantes.

Una vez obtenidos los resultados de la minería de datos, se aplicó la técnica de clustering K-Means para agrupar los datos en conjuntos homogéneos. Esta técnica permitió identificar grupos de elementos similares, basándose en características y atributos compartidos.

Luego, se procedió a realizar un análisis de los clusters obtenidos, examinando cuidadosamente sus características distintivas y las interrelaciones existentes entre ellos.

Finalmente, para verificar y validar el modelo de clustering obtenido, se aplicó una herramienta de validación de clusters. Esto permite evaluar la calidad y la coherencia de los clusters generados, garantizando así la robustez y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

3.1. Generación de base de datos

La generación de la base de datos (en adelante, BBDD) se llevó a cabo utilizando un universo de 30 minas localizadas en Chile. Cada mina fue considerada como una fila en la BBDD, mientras que los parámetros geométricos correspondientes a cada diseño de mina a cielo abierto fueron dispuestos como columnas. La obtención de estos parámetros geométricos se realizó mediante el uso del software Google Earth Pro. A continuación, se entrega una descripción de cada una de las variables obtenidas y registradas en la BBDD.

1. **Región:** Se investiga la ubicación de cada mina en el software y se valida por web.
2. **Mineral:** Para obtener esta información, se realizaron consultas en la página oficial de COCHILCO, la Comisión Chilena del Cobre. En el caso de las minas de carácter más privado o menos conocidas, se realizaron búsquedas en páginas especializadas de la industria minera.
3. **Longitud de rajo (m):** Para obtener esta variable, se utilizó el software Google Earth Pro en vista planta, manteniendo la dirección de N a S. Luego, se empleó la herramienta 'Ruta de acceso 3D' para medir desde un punto inferior hasta un punto superior. Al finalizar la medición, se verificaron las propiedades de la línea generada y se registró la longitud del rajo en unidades de metro. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 26.

4. **Ancho de rajo** (m): Para obtener esta variable, se utilizó el software en vista planta, manteniendo la dirección de O a E. A continuación, se empleó la herramienta 'Ruta de acceso 3D' para medir desde un punto inferior hasta un punto superior. Al finalizar la medición, se verificaron las propiedades de la línea generada y se registró la longitud del rajo en unidades de metro. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 27.
5. **Razón elíptica**: Este parámetro se calcula como la relación entre el valor máximo de la longitud y ancho del rajo, y el valor mínimo entre la longitud y el ancho del rajo (Ver Ec. 4).

$$\text{Razón elíptica} = \frac{\max(\text{longitud}, \text{ancho})}{\min(\text{longitud}, \text{ancho})} \quad (4)$$

6. **Elevación pie** (m): Esta variable se obtuvo considerando el nivel del mar como punto de referencia. Para ello, se estableció un punto de referencia en cada rajo, específicamente el banco más bajo de la mina, y se verificó su altitud en unidades de metro. Sin embargo, se observó que en algunas situaciones la coordenada Z no proporcionaba mediciones precisas en comparación con la realidad. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 28.
7. **Elevación cresta** (m): Este parámetro se obtuvo de la misma manera que la Elevación pie. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 29.
8. **Perímetro** (m): Para obtener esta variable, se utilizó la herramienta 'polígono' en Google Earth Pro, en vista planta. Se procedió a dibujar el polígono en el contorno superior de la mina, a nivel de superficie. Posteriormente, se accedió a las propiedades de este polígono y se extrajo la medición del perímetro en unidades de metro. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 30.
9. **Área** (m^2): Este parámetro fue obtenido de la misma manera que el perímetro en unidades de metros cuadrados. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 30.
10. **Volumen** (m^3): Se evaluó la posibilidad de utilizar datos raster proporcionados por la NASA para importarlos en el software QGIS y generar curvas de nivel. Estas curvas serían posteriormente exportadas al software AutoCAD para crear un modelo sólido y calcular el volumen. No obstante, se constató que los datos raster descargados estaban desactualizados, lo que reducía su idoneidad para este propósito. En consecuencia, se determinó calcular el volumen empleando la fórmula de un cono de base elipsoidal, considerando la longitud y el ancho de cada rajo como los semiejes correspondientes (Ver Ec. 5).

$$Volumen = \frac{\text{longitud del rajo} * \text{ancho} * \text{profundidad} * \pi}{3} \quad (5)$$

11. **Longitud de talud global (m):** Este valor se obtuvo utilizando la herramienta 'Ruta de acceso 3D', trazando una ruta desde el pie del banco más bajo hasta la cima del banco más alto -hasta la superficie-. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 31.
12. **Producción anual del año 2020 (ton):** Se realizó una búsqueda en fuentes confiables como COCHILCO y diversas páginas oficiales de la industria minera para recopilar los datos de producción de las minas para el año 2020. Sin embargo, se encontraron algunas limitaciones en la disponibilidad de información debido a la privacidad de los datos de producción de ciertas mineras o a la falta de reconocimiento público de algunas operaciones mineras menos conocidas. En consecuencia, se registraron los valores en blanco cuando no fue posible obtener la información correspondiente.
13. **Ancho de rampa (m):** Para medir este valor, se utilizó la herramienta 'Línea', la cual permitió determinar la longitud correspondiente a la anchura de la rampa en cuestión. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 32.
14. **Longitud de rampa (m):** Para obtener este parámetro, se utilizó la herramienta 'Ruta', la cual permitió realizar una medición precisa de la distancia total de la rampa, desde un punto de inicio ubicado en una topografía inferior específica, hasta su finalización en la superficie. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 33.
15. **Cantidad de switchbacks:** Utilizando la longitud de la rampa obtenida mediante la herramienta 'Ruta', se procedió a contar el número de cambios de dirección en forma de U presentes en la configuración de la rampa de la mina. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 33.
16. **Altura de banco (m):** Para realizar la medición de este parámetro, se emplea la herramienta 'Ruta de acceso 3D', la cual permite trazar una ruta desde el pie del banco hasta el tope del mismo banco. Para una mayor información respecto a la medición de este parámetro, se recomienda consultar el Anexo A - Figura 34.
17. **Ángulo global de rajo ($^{\circ}$):** Para determinar este parámetro, se utilizó inicialmente la herramienta 'Ruta' para medir la distancia entre dos puntos en el suelo y generar un perfil de elevación. No obstante, debido a la discrepancia entre los resultados obtenidos y la realidad, se optó por calcular los ángulos utilizando la siguiente Ec. 6.

$$\text{Ángulo global de rajo} = \text{seno}\left(\frac{\text{Profundidad del rajo}}{\text{Longitud del talud global}}\right) \quad (6)$$

18. **Profundidad del rajo:** Se calculó mediante la Ec. 7.

$$\text{Profundidad del rajo} = \text{Altura de banco} * \text{Cantidad de bancos} \quad (7)$$

19. **Cantidad de bancos:** Esta variable se determinó contando la cantidad de bancos que existen en cada una de las minas mediante las imágenes satelitales del software.

20. **Desprendimiento de talud:** Este parámetro se obtuvo utilizando la herramienta "Historial temporal de imágenes". Mediante esta herramienta, se analizaron imágenes satelitales en un período de 10 años para identificar la presencia de desprendimientos de talud. Para corroborar la información obtenida, se realizó una consulta en línea para verificar si se habían registrado casos de desprendimiento de talud en los últimos 10 años. Se aplicó un criterio de percepción propio para cuantificar el nivel de desprendimiento en una escala del 0 al 4, donde 0 representa la ausencia de desprendimiento, 1 indica un desprendimiento leve, 2 denota un desprendimiento considerable, 3 señala un desprendimiento importante, y 4 indica un desprendimiento severo (Para mayor detalle sobre la medición de esta variable consultar Anexo - A).

21. **Forma:** Esta variable se refiere a la configuración geométrica del rajo según la imagen satelital. Se realizó una categorización de esta variable, donde se asignaron los siguientes valores: 1 para representar un rajo circular, 2 para un rajo elipsoidal, 3 para un rajo hexagonal, 4 para un rajo con forma de rayo y 5 para un rajo con forma de estrella (Para mayor detalle sobre la medición de esta variable consultar Anexo - A).

3.2. Análisis y generación de Clusters

3.2.1. Análisis exploratorio de datos

Una vez creada la BBDD, se llevó a cabo un análisis exploratorio de datos. Durante este proceso, se empleó diversas técnicas estadísticas y gráficas para obtener una visión general del comportamiento de los datos.

3.2.2. Imputación de datos

Tras la realización del análisis exploratorio de los datos, se constató la presencia de valores faltantes en la BBDD. Con el fin de abordar esta situación, se optó por utilizar el método del vecino más cercano. Dicho método se basa en la estimación de los valores faltantes a partir de su relación con otras variables presentes en el conjunto de datos.

3.2.3. K-Means

Una vez completada la BBDD con valores faltantes y finalizado el análisis exploratorio de los datos, se procede a aplicar el algoritmo de K-Means utilizando Python.

En Python, se utiliza el lenguaje de programación y sus bibliotecas especializadas, como scikit-learn, para implementar el algoritmo de K-Means. Este enfoque permite una mayor flexibilidad y personalización al ajustar los parámetros del algoritmo y realizar ajustes específicos según los requisitos del proyecto.

La aplicación de K-Means en Python permite explorar y descubrir patrones y agrupamientos en los datos, lo que proporciona una mejor comprensión de la estructura subyacente y ayuda en la toma de decisiones basadas en datos.

3.2.4. Validación de Cluster

Para la validación de los clústeres, se utilizó el Coeficiente de Silueta como medida para evaluar el nivel de agrupamiento realizado por el algoritmo de K-Means.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En esta sección se presentarán los resultados del análisis exploratorio de datos, con el objetivo de identificar posibles errores evidentes, comprender patrones presentes en los datos, detectar valores atípicos o eventos anómalos, y descubrir relaciones interesantes entre las variables.

Posteriormente, se mostrará el proceso de imputación de datos para abordar los valores faltantes. Además, se exhibirán los resultados obtenidos mediante la aplicación del algoritmo de K-Means para la formación de clusters.

4.1. Análisis exploratorio de Datos

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos durante el análisis exploratorio de datos (en adelante, EDA) de los parámetros geométricos considerados en la base de datos. En este apartado, se dará prioridad a las variables más relevantes o aquellas que hayan mostrado un comportamiento distintivo durante el análisis. Además, se incluirá una matriz de correlación de las variables para identificar las correlaciones más significativas entre ellas. Para acceder a información detallada sobre el EDA de los demás parámetros geométricos, se recomienda consultar el Anexo B, donde también se proporciona una tabla con estadísticas descriptivas específicas para cada variable.

4.1.1. Área

El tamaño de las minas a cielo abierto presenta una variabilidad considerable en el rango de áreas, que va desde 107,916 [m^2] hasta 9,234,071 [m^2]. El promedio de estas áreas es de 2,876,515 [m^2], con una desviación estándar de 2,347,720 [m^2]. La mediana, que corresponde al segundo cuartil (Q2), se sitúa en 2,670,998 [m^2]. El primer cuartil (Q1) tiene un valor de 828,407 [m^2], mientras que el tercer cuartil (Q3) es de 3,792,911 [m^2]. Estos resultados indican una amplia diversidad en las áreas de las minas a cielo abierto en el conjunto de datos.

Al analizar el tamaño de las minas en relación con las diferentes regiones de Chile, se observa que las minas de mayor envergadura se concentran principalmente en la Región de Antofagasta. Sin embargo, es importante destacar que existen tres casos que difieren notablemente de esta tendencia observada en las demás minas. Estos casos atípicos son Chuquicamata, Escondida Rajo Sur y Los Pelambres, que presentan áreas de minas que escapan significativamente del estándar (Ver Figura 13).



Figura 13: Parámetro geométrico - Área
Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Volumen

El mismo análisis realizado para el parámetro geométrico del área se aplica de forma similar al parámetro del volumen. Al examinar el Gráfico 14, se observa que existe una mina cuyo valor en función de este parámetro geométrico podría considerarse atípico. No obstante, esta mina no será excluida de la base de datos debido a que en la realidad la mina Chuquibambilla es una de las minas a cielo abierto más grandes a nivel global y la de mayor envergadura a nivel nacional. Por ende, resulta coherente que su valor de volumen se desvíe de la norma en comparación con las otras minas de diferentes regiones, considerando su relevancia en la aplicación práctica y la industria minera en general.

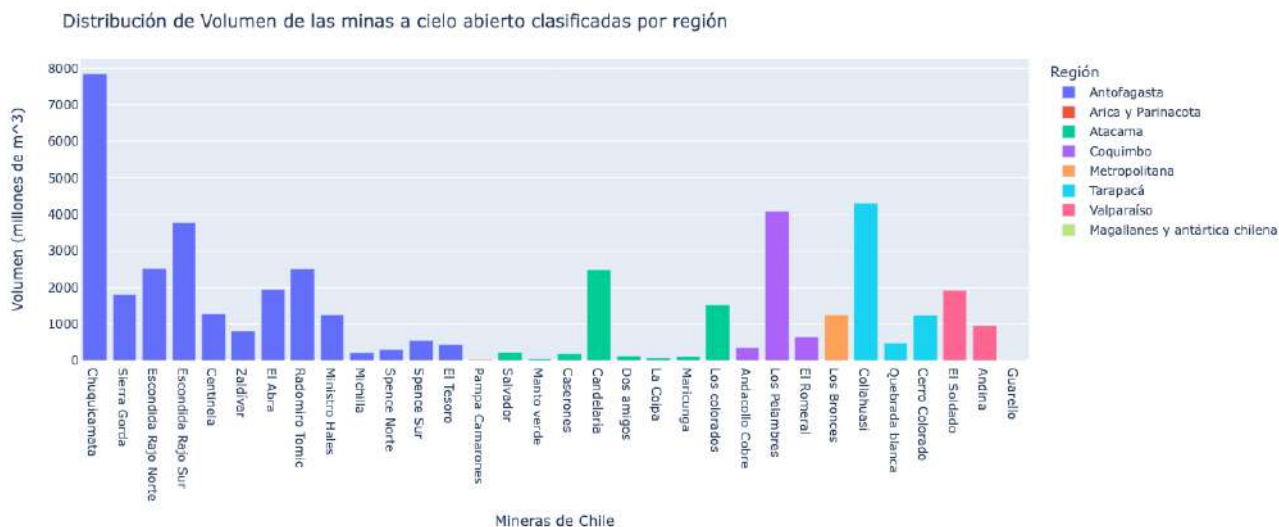


Figura 14: Parámetro geométrico - Volumen
Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Ángulo global

El ángulo global en las minas a cielo abierto presenta una amplia variabilidad, con valores que oscilan entre 11 grados y 54 grados. La media de este ángulo es de 28 grados, con una desviación estándar de 9 grados. La mediana (Q2) se sitúa en 26 grados, mientras que el primer cuartil (Q1) y tercer cuartil (Q3) corresponden a 22 grados y 33 grados, respectivamente. Estos datos evidencian una notable diversidad en los ángulos globales de las minas a cielo abierto.

Al examinar el Gráfico 15, se pueden apreciar fluctuaciones alrededor de los 20° y 50° en todas las regiones de Chile. Específicamente, se destaca un dato que se aparta de esta norma, correspondiente a la minera Manto Verde, el cual podría considerarse un posible valor atípico. Sin embargo, este dato no será descartado debido a que existen dos posibles explicaciones para esta discrepancia. En primer lugar, es posible que el Software Google Earth Pro haya presentado ciertos errores en la medición de la dimensión Z, lo que implica que podría haber errores de subestimación o sobreestimación en la medición de ángulo en algunos sectores. Por otro lado, es también probable que la minera Manto Verde trabaje con ángulos de inclinación más pronunciados debido a que la mina no es muy profunda, con una profundidad de 235 [m], lo cual podría justificar la capacidad de soportar esos ángulos de inclinación en el talud global.



Figura 15: Parámetro geométrico - Ángulo global
Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Longitud del talud global

La longitud del talud global en las minas a cielo abierto presenta una variación que abarca desde 156 [m] hasta 1389 [m]. La media de esta longitud es de 600 [m], con una desviación estándar de 343 [m]. La mediana (Q2) se sitúa en 537 [m], mientras que el primer cuartil (Q1) y tercer cuartil (Q3) corresponden a 296 [m] y 914 [m], respectivamente. Estos resultados revelan una notable variabilidad en las longitudes de los taludes globales en las minas a cielo abierto.

Al analizar la Figura 16 en relación a las distintas regiones de Chile, se observa una presencia de valores elevados, alrededor de los 1000 [m], así como otros valores más reducidos en torno a los 200 [m]. Ahora bien, dentro de este conjunto de minas, se destaca la minera Collahuasi como un caso atípico que difiere significativamente en términos de la longitud de su talud global. En este caso, no se considera apropiado eliminar este dato, ya que la minera Collahuasi cuenta con políticas y enfoques específicos en la construcción de sus taludes, debido a la configuración particular de su mina, que se caracteriza por ser más abierta y tener una forma más circular. Por lo tanto, es comprensible que la longitud de su talud global sea mayor en comparación con otras minas.



Figura 16: Parámetro geométrico - Longitud talud global
Fuente: Elaboración propia

4.1.5. Producción anual

La producción en las minas a cielo abierto presenta una variabilidad que abarca desde 10,700 toneladas hasta 606,000 toneladas de cobre fino. Sin embargo, se observa en el Gráfico 17 la presencia de 5 valores faltantes (NaN) en el conjunto de datos correspondientes a esta variable. Estas ausencias se deben a la falta de información disponible para dichos registros en la fuente consultada. Con el fin de abordar esta situación y obtener una perspectiva más completa de las estadísticas básicas de este parámetro, se empleó la técnica de imputación de datos mediante el método del vecino más cercano (*K-nearest neighbors*). Una vez aplicada esta estrategia, se procedió a calcular las estadísticas básicas del parámetro, obteniendo los siguientes resultados:



Figura 17: Producción total de cobre fino en toneladas en el año 2020

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1: Estadísticas básicas

Variable	Valor (kton)
Cantidad	32
Promedio	197
Desviación Estándar	179
Mínimo	10
Percentil 25	74
Mediana	124
Percentil 75	286
Máximo	606



Figura 18: Producción total en toneladas en el año 2020 con imputación de datos
Fuente: Elaboración propia

4.1.6. Cantidad de switchbacks

Según el análisis estadístico, se observa que la cantidad de switchbacks en las minas varía desde 0 hasta 9. El promedio de switchbacks es de 3, lo que indica que en promedio se encuentran alrededor de 3 cambios de dirección en los caminos de las minas. La desviación estándar es de 2, lo que sugiere cierta variabilidad en la cantidad de switchbacks entre las diferentes minas.

La mediana (Q2) se sitúa en 3, lo que implica que el valor central de la distribución de los datos se encuentra en 3. Esto indica que aproximadamente la mitad de las minas tienen 3 switchbacks o menos, mientras que la otra mitad tiene 4 o más.

Los valores del primer cuartil (Q1) y tercer cuartil (Q3) son 1 y 5, respectivamente. Esto significa que el 25 % de las minas cuentan con 1 switchback o menos, mientras que el 75 % posee 5 switchbacks o más. Esto indica una variabilidad moderada en la cantidad de switchbacks entre las minas a cielo abierto.

Al observar el Gráfico 19, se aprecia una variabilidad regional en relación a este parámetro, probablemente debido a las decisiones del planificador y las políticas establecidas por cada empresa minera. Además, se observa que minas como Chuquibambilla y Los Pelambres presentan una gran cantidad de switchbacks hasta llegar al pit final. Esto puede deberse a que son minas de gran envergadura y profundidad, y requieren la implementación de switchbacks por motivos logísticos o debido a las características del yacimiento que exigen generar estos cambios de dirección para la extracción del mineral.



Figura 19: Parámetro geométrico - Cantidad de switchbacks

Fuente: Elaboración propia

4.1.7. Desprendimiento de talud

El desprendimiento de talud en las minas a cielo abierto es un aspecto crítico que requiere una especial atención en términos de seguridad y estabilidad de la infraestructura minera. Para comprender mejor esta variable, se ha realizado un análisis estadístico de los datos disponibles.

En este análisis, se ha determinado que el desprendimiento de talud en las minas a cielo abierto varía en una escala categórica de 0 a 4, donde cada valor representa un nivel diferente de gravedad. A partir de los datos recopilados, se ha observado lo siguiente:

- El rango de desprendimiento de talud va desde 0 hasta 4, lo que indica la presencia de diferentes niveles de desprendimiento en las minas a cielo abierto estudiadas.
- La media del desprendimiento de talud es de 1, lo que sugiere una tendencia hacia desprendimientos leves en general.
- La desviación estándar es de 1, lo que indica una variabilidad moderada en los niveles de desprendimiento de talud.
- La mediana se encuentra en 1, lo que sugiere que la mitad de las observaciones presentan desprendimientos de talud leves.
- El primer cuartil se sitúa en 0 y el tercer cuartil en 2, lo que indica que la mayoría de las minas experimentan desprendimientos de talud en niveles bajos a moderados.

Por lo tanto, en base a estos resultados, el desprendimiento de talud es posible catalogarlo con una variabilidad prudente.

Estas estadísticas resaltan la importancia de abordar de manera adecuada el desprendimiento de talud en las minas a cielo abierto. Aunque se observe una variabilidad moderada, es fundamental tomar medidas preventivas y de control en todos los niveles de desprendimiento identificados.

Además de la escala categórica utilizada, es vital considerar el contexto y la gravedad de cada nivel de desprendimiento de talud. Si bien los desprendimientos leves pueden parecer menos preocupantes, no se debe subestimar su impacto potencial en la seguridad de los trabajadores y la integridad de la infraestructura minera. Por lo tanto, es fundamental implementar prácticas sólidas de monitoreo, inspección y diseño para mitigar los riesgos asociados con el desprendimiento de talud.

En el Gráfico 20, se presentan los distintos niveles de desprendimiento de talud observados en las minas a cielo abierto analizadas.



Figura 20: Parámetro geométrico - Desprendimiento de talud

Fuente: Elaboración propia

En otro contexto, se presenta en la Figura 21 una matriz de correlación:



Figura 21: Matriz de correlación

Fuente: Elaboración propia

Al analizar la matriz de correlación, se puede inferir que existen correlaciones significativas entre las variables, especialmente en relación al tamaño de las minas a cielo abierto, lo cual es coherente dado que se trabajan con parámetros geométricos específicos de los rajos mineros.

En particular, se observa una fuerte correlación (con valores cercanos a 0.8 a 0.9) entre los parámetros de volumen, área, perímetro y longitud de rajo, todos ellos relacionados directamente con el tamaño de la mina. Esto indica que a medida que la mina es más grande, aumentan proporcionalmente estos parámetros geométricos.

Además, junto a los parámetros de volumen, área, perímetro y longitud de rajo, se encuentra una fuerte correlación (con valores cercanos a 0.8) con la longitud de rampa. Esto sugiere que el tamaño de la mina influye en la extensión de las rampas utilizadas para acceder a diferentes niveles de la mina.

Por otro lado, se destaca que el parámetro "desprendimiento de talud", relevante en la industria minera, no presenta una correlación significativa con respecto a las demás variables analizadas.

4.2. Resultados de cluster

Mediante el uso de Python, se empleó el algoritmo de K-Means para generar los clusters basados en los parámetros geométricos. La elección de 5 grupos se fundamenta en dos razones:

1. En primer lugar, de acuerdo con el Método del Codo (ver Figura 22), se indica que la cantidad óptima de clusters es 2, con una inercia o suma de distancias al cuadrado es alrededor de 439. Sin embargo, por consideraciones pertinentes a los objetivos de la investigación y para reflejar la realidad estudiada, se decide considerar un número mayor de clusters.
2. Por otra parte, se realiza la iteración del algoritmo en diversas ocasiones para distintos valores de k , en un rango que abarca de 3 a 7 clusters. Finalmente, se selecciona el valor de k igual a 5, debido a que permite alcanzar una distribución más equitativa de elementos entre cada grupo.

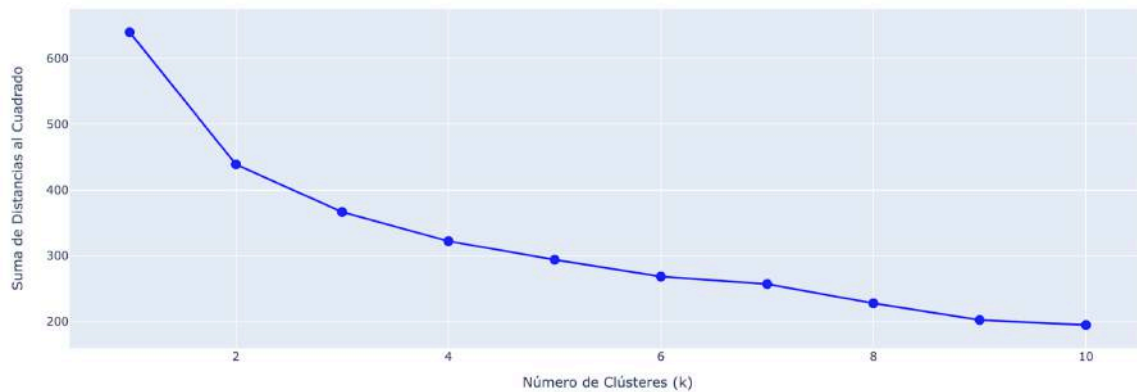


Figura 22: Resultado del Método del codo
Fuente: Elaboración propia

Basándonos en lo anterior, se han obtenido los siguientes resultados, los cuales se encuentran presentados en la Tabla 2. En dicha tabla, se detallan los diferentes parámetros geométricos utilizados, organizados por la cantidad de clusters que es igual a 5. Los números en la tabla representan las medias de los parámetros geométricos correspondientes a las 30 minas.

Cluster	0	1	2	3	4
Longitud rajo [m]	2,317	1,391	3,157	1,100	1,221
Ancho rajo [m]	1,990	1,307	2,724	871	1,832
Razón elíptica	2	1	1	1	2
Elevación pie rajo [m]	2,236	1,836	3,174	933	3,658
Elevación cabeza rajo [m]	2,522	1,952	3,633	1,123	3,969
Perímetro [m]	7,141	4,598	9,785	3,245	5,299
Área del rajo [km^2]	3.56	1.56	6.92	0.93	1.80
Volumen del rajo [km^3]	1.71	333.31	4507.08	440.49	503.22
Ángulo global del rajo [°]	26	27	27	39	18
Longitud de talud global [m]	821	271	1,023	363	584
Producción anual [$kton$]	140	188	496	52	188
Ancho de rampa [m]	28	24	32	18	22
Longitud de rampa [m]	5,475	2,061	7,040	2,427	2,589
Cantidad de switchbacks	5	2	6	2	1
Altura de banco [m]	12	10	11	12	12
Profundidad del rajo [m]	366	138	502	265	176
Cantidad de bancos	30	14	46	22	15
Desprendimiento de talud	1	0	3	1	2
Forma	2	3	3	2	3

Tabla 2: Media de cada variable en función de cada cluster hecho por K-Means.

4.3. Validación del modelo

Para validar el modelo, se han evaluado dos enfoques: en primer lugar, mediante el uso del coeficiente de silueta; y en segundo lugar, a través de la aplicación de otro algoritmo de clustering.

En la Figura 23, se presenta la validación del modelo utilizando el coeficiente de silueta. Al haber seleccionado 5 clusters, el coeficiente de silueta obtenido es aproximadamente 0.13. Esta métrica sugiere que el modelo se ubica en un nivel intermedio, no siendo ni claramente positivo ni negativo. No obstante, dado que está por encima de cero, tiende a ser más aceptable que insatisfactorio.

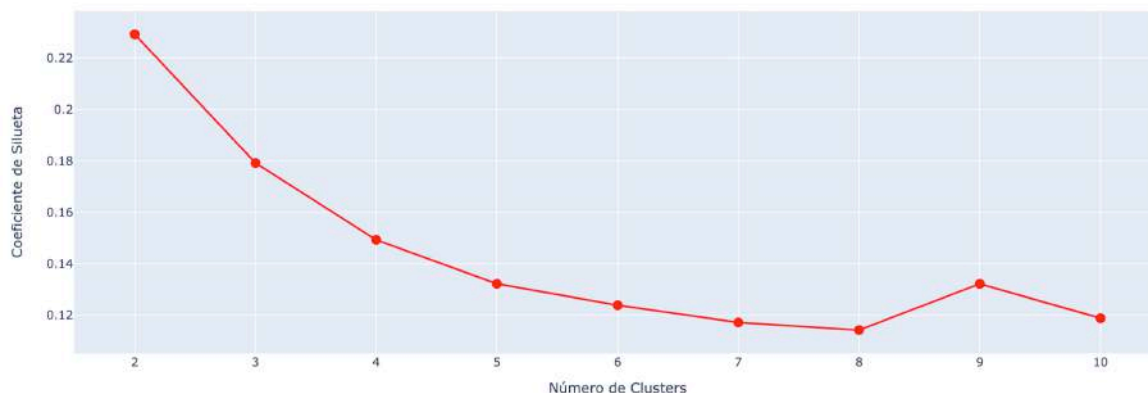


Figura 23: Validación mediante Coeficiente de Silueta
Fuente: Elaboración propia

Ahora, en relación al segundo aspecto, se implementó el algoritmo de Clustering Jerárquico, y como resultado se obtuvo el siguiente dendrograma que visualiza gráficamente la estructura de los clusters generados por el algoritmo (consulte la Figura 24).

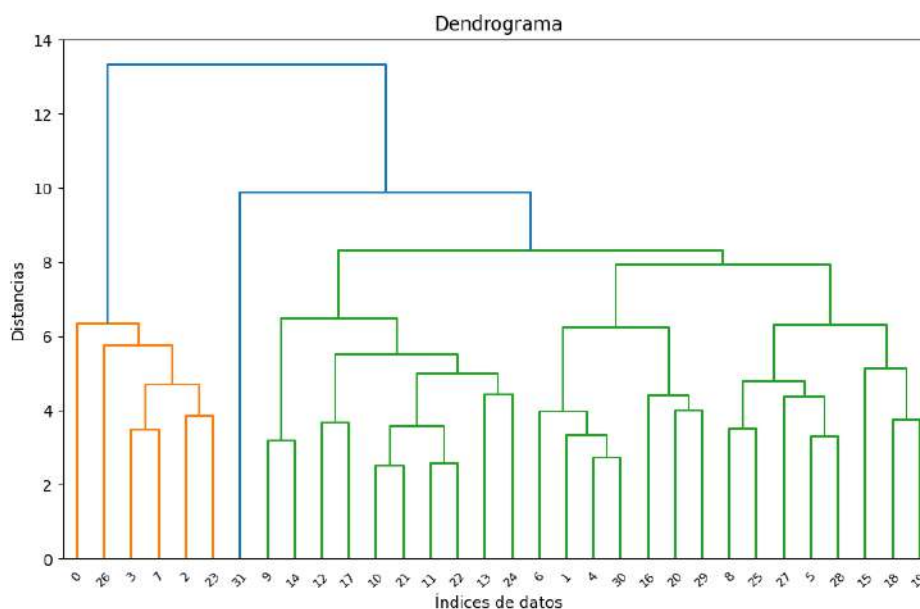


Figura 24: Dendrograma
Fuente: Elaboración propia

Al aplicar el Coeficiente de Silueta al Clustering Jerárquico, se observa el resultado siguiente, plasmado en un gráfico similar al empleado en el caso de K-Means (ver Figura 25).



Figura 25: Validación mediante Coeficiente de Silueta en Clustering Jerárquico

Fuente: Elaboración propia

Es evidente que, al aplicar el algoritmo de Clustering Jerárquico con un número de clusters igual a 5, se obtiene un coeficiente de silueta de 0.13, lo que valida el modelo elaborado mediante K-Means. Este resultado sugiere una coherencia similar en la agrupación de los elementos entre ambos métodos.

4.4. Análisis

El análisis de los resultados de K-Means para el clustering de las minas a cielo abierto nos permite identificar diferentes grupos de minas que comparten características similares. Cada cluster tiene un conjunto único de atributos geométricos y operativos que los distinguen entre sí. A continuación, se presenta un análisis detallado de cada cluster:

■ Cluster 0 - 'Moderado y Eficiente':

Este grupo exhibe valores moderados en la mayoría de las métricas evaluadas. Tanto la longitud como el ancho del rajo muestran dimensiones intermedias (2,317 [m] y 1,990 [m] respectivamente), lo que apunta a una escala razonable de la operación minera. Adicionalmente, la razón elíptica, que se acerca al valor 2, sugiere una conformación geométrica equilibrada del rajo. Tanto la elevación en la base del rajo como en la parte superior presentan niveles relativamente bajos (2,236 [m] y 2522 [m] respectivamente), lo que podría indicar una ubicación ventajosa del yacimiento en relación con la topografía circundante.

El ángulo global del rajo oscila entre 26 y 27 grados, un rango que podría favorecer la estabilidad del talud al mismo tiempo que sugiere una expansión más horizontal que vertical del rajo. La longitud de la rampa se encuentra en términos medios, denotando una planificación eficaz del acceso. La cantidad de 'switchbacks' es de 5, siendo esta alta con respecto a los otros clusters, lo que apunta a una disposición no tan directa de las rampas de acceso, afectando el tránsito y la visibilidad de los operadores mineros. La altura de los bancos es moderada (12 [m]), facilitando la operación de los equipos de extracción. En consideración a estos aspectos, se infiere que este grupo ha experimentado desprendimientos de talud de categoría leve en periodos recientes, lo que indica una tendencia a la estabilidad y eficiencia operativa. No obstante, en términos de producción anual, este grupo se ubica en una posición intermedia, siendo uno de los mayores en tamaño de rajo pero con resultados de producción anual comparativamente más bajos.

Recomendaciones: Aunque este grupo demuestra una gestión eficiente en cuanto a dimensión y geometría, se sugiere un análisis constante de los procedimientos operativos para identificar áreas susceptibles de mejora en productividad y reducción de costos. Además, se propone evaluar la viabilidad de incorporar tecnologías de monitoreo geotécnico avanzadas, con el objetivo de preservar la estabilidad del talud y asegurar la integridad a largo plazo de la operación minera.

- **Cluster 1 - 'Estabilidad Geotécnica y Sostenible':** En este cluster, se aprecia que son rajes más pequeños o pequeña escala, además se observa una elevación moderada en el pie del rajo, la longitud de la rampa y la cantidad de bancos (1,836 [m], 2,061 [m] y 14 respectivamente). Sin embargo, el valor más distintivo es la ausencia de desprendimiento de talud (categorizado como 'nada o nulo'). Esto sugiere una operación que ha logrado un nivel notable de estabilidad geotécnica en los últimos 10 años. De hecho, son rajes pequeños con una producción anual de cobre fino no a gran escala (188 [kton]), pero la que más seguridad tiene debido a que la variable de desprendimiento de talud está en nivel de nulo en los últimos periodos.

Es esencial mantener un enfoque en la gestión de riesgos geotécnicos y en la implementación de medidas de prevención para mantener esta condición favorable de estabilidad. Además, se podría considerar la optimización de los procesos mineros para aumentar la eficiencia y la producción, aprovechando la base sólida de estabilidad geotécnica.

Recomendaciones: Dado el destacado nivel de estabilidad geotécnica demostrado en este cluster, es crucial mantener una vigilancia constante en la gestión de riesgos geotécnicos. Sin embargo, también es importante aprovechar esta base sólida para implementar mejoras en la eficiencia operativa y en la utilización de recursos. Considera la posibilidad de adoptar tecnologías innovadoras para optimizar y aumentar la producción anual de cobre fino.

- **Cluster 2 - 'Gran Escala y Extracción Eficiente':**

Este cluster se caracteriza por tener los valores más altos en longitud de rajo, ancho de

rajo, área del rajo y volumen del rajo y de producción (3,157 [m], 2,724 [m], 6.92 [km²], 4507.08 [km³] y 496 [kton] respectivamente), indicando operaciones mineras de gran escala. La elevación de la cabeza del rajo y el perímetro también son notables (3,633 [m] y 9,785 [m] respectivamente), por lo tanto, son rajes que abarcan gran cantidad de espacio territorial lo que podría afectar a comunidades aledañas. Sin embargo, es importante destacar que este cluster presenta un nivel 'considerable' de desprendimiento de talud en los últimos 10 años.

Dada la magnitud de la operación, es crucial enfocarse en la estabilidad geotécnica. Se recomienda la implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo y análisis geotécnico para mitigar los riesgos asociados con el desprendimiento de talud. Además, se podría explorar la optimización de los métodos de extracción y transporte para garantizar una operación eficiente.

Recomendaciones: Dada la gran escala de esta operación, es imperativo priorizar la seguridad y la estabilidad geotécnica. Implementa un programa riguroso de monitoreo y análisis geotécnicos para mitigar los riesgos de desprendimiento de talud. Además, busca oportunidades para optimizar los métodos de extracción y transporte, así como para diversificar los recursos minerales extraídos.

■ **Cluster 3 - 'Tamaño Moderado y Rentable':**

Este cluster muestra una producción anual moderada en comparación con otros grupos a pesar de ser el grupo de rajes más chicos. La longitud y el área del rajo son pequeños (1,100 [m] y 0.93 [m]), lo que sugiere una operación de pequeña escala. La elevación de la cabeza del rajo es relativamente baja (1,123 [m]), lo que puede indicar una ubicación favorable del yacimiento. Sin embargo, es importante destacar que ocupa ángulos de taludes más inclinados (39 [°]) pero a pesar de eso no tiene la menor producción anual y tiene un nivel de desprendimiento de talud de leve.

Dado que este cluster representa operaciones con una producción rentable, se podría considerar la implementación de estrategias para aumentar la eficiencia operativa. Además, es esencial evaluar y mitigar los riesgos asociados con el nivel 'importante' de desprendimiento de talud.

Recomendaciones: Para mantener la rentabilidad en este cluster, considera estrategias de optimización de procesos y de reducción de costos. Explora nuevas tecnologías y enfoques para mejorar la eficiencia operativa y maximizar la producción. Además, mantén un enfoque constante en la gestión de riesgos geotécnicos y en la seguridad de los trabajadores.

■ **Cluster 4 - 'Dimensiones Geotécnicas Cruciales':**

Este cluster se destaca por tener una elevación significativa en el pie del rajo y la cantidad de bancos (3,658 [m] y 15 respectivamente). Estas características podrían indicar un enfoque en la estabilidad geotécnica. Sin embargo, también se observa un nivel 'importante' de desprendimiento de talud. Y además, tienen la tercera mejor cantidad en producción anual (188 [kton]).

La prioridad principal para este cluster es implementar medidas de mitigación para abordar los desafíos geotécnicos y garantizar la seguridad de la operación. La colaboración con expertos en geología y geotecnia es fundamental para desarrollar soluciones efectivas. Además, se podría explorar la optimización de los métodos de extracción para garantizar una operación rentable.

Recomendaciones: La estabilidad geotécnica es la principal preocupación en este cluster. Trabaja en estrecha colaboración con expertos en geología y geotecnia para implementar medidas de mitigación efectivas y garantizar la seguridad de la operación. Además, considera la optimización de los métodos de extracción y el desarrollo de estrategias de planificación a largo plazo que prioricen la estabilidad del talud.

En general, los resultados del clustering muestran la diversidad de características entre las minas a cielo abierto y nos brindan información valiosa para tomar decisiones operativas y estratégicas. Es importante reconocer las particularidades de cada cluster y adaptar las prácticas mineras para garantizar la extracción eficiente y segura de los recursos minerales. Además, se sugiere realizar análisis adicionales y seguimiento constante de las operaciones para mejorar continuamente la productividad y la estabilidad en las minas a cielo abierto.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Los parámetros geométricos son un aspecto esencial en el diseño de minas a cielo abierto, ya que abarca diferentes elementos que contribuyen a una operación eficiente de la mina. Hoy en día, estos se configuran a partir del criterio de cada planificador minero presente en la mina. En ese sentido, es que a partir de la forma actual en la que se levanta este parámetro, es que se decide hacer una revisión a cuál es su efecto en términos de la configuración del parámetro geométrico en las minas de cielo abierto en Chile.

Para ello, se llevó a cabo la clasificación de diseños de minas a cielo abierto mediante el análisis de imágenes satelitales. La metodología adoptada implicó la creación de una base de datos robusta, incorporando las variables geométricas más influyentes en la conformación de minas superficiales. A través de un proceso de normalización, se prepararon los datos para la aplicación de un algoritmo de aprendizaje automático, específicamente K-Means. Este enfoque culminó en la identificación y creación de cinco clusters distintos, cada uno caracterizado por sus parámetros geométricos específicos de cada grupo.

A partir de esta agrupación y los patrones identificados, se obtuvo como resultado que hoy en día las minas a cielo abierto en nuestro país están configuradas con diferencias importantes en cuanto a los elementos que pertenecen al parámetro geométrico del diseño de la mina. En ese sentido, es que es relevante que exista un marco normativo que dictamine algunos aspectos transversales al diseño de mina, con el fin de que se ordene y levante bases iniciales para regular los parámetros geométricos de las minas, los cuales resultaron con diferencias sustanciales.

Para proyecciones futuras, se recomienda que este tipo de medición se expanda más allá de los elementos geométricos, pues debería abarcar aspectos litológicos, la composición de la veta mineral, la cantidad y tipo de equipos utilizados, la ley del mineral extraído y otros factores significativos. Todo ello con la finalidad de ser caracterizados, y desde allí, sentar las bases para un ordenamiento regulatorio en estas materias a nivel país.

Por otro lado, para realizar este proceso de caracterización, se sugiere ampliar la muestra de minas examinadas, ya que una mayor cantidad de datos suele potenciar la efectividad de los algoritmos de clasificación. La aplicación de distintos algoritmos de agrupación a la base de datos podría aportar nuevas perspectivas y validar los resultados obtenidos con K-Means.

En cuanto a las herramientas técnicas, podría ser beneficioso explorar alternativas de software para la visualización de imágenes satelitales -como lo es ArcGis Pro y ERDAS IMAGINE-, dado que ciertas limitaciones de precisión en Google Earth Pro pueden impactar la calidad y exactitud de los datos capturados.

Ahora bien, en un horizonte más amplio, se vislumbra la posibilidad de implementar un algo-

ritmo multimodal que combine datos provenientes de imágenes satelitales y otras fuentes, enriqueciendo la información sobre los parámetros geométricos de las minas. Esta innovación reviste una importancia trascendental, ya que un diseño minero adecuado no solo optimiza la extracción de recursos, sino que también contribuye de manera significativa a la seguridad y el bienestar de los trabajadores.

Es crucial resaltar que esta evaluación no pretende reemplazar ni influir directamente en la toma de decisiones de los planificadores, sino más bien proporcionar un enfoque comparativo y de evaluación que puede desembocar en la formulación de recomendaciones o la identificación de limitaciones para cada diseño. En última instancia, esta investigación busca esclarecer patrones y tendencias, aportando una valiosa contribución al campo del diseño de minas a cielo abierto.

ANEXOS

Anexo A: Obtención de parámetros geométricos en Software Google Earth Pro



Figura 26: Medición de Longitud de rajo
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 27: Medición de Ancho de rajo
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

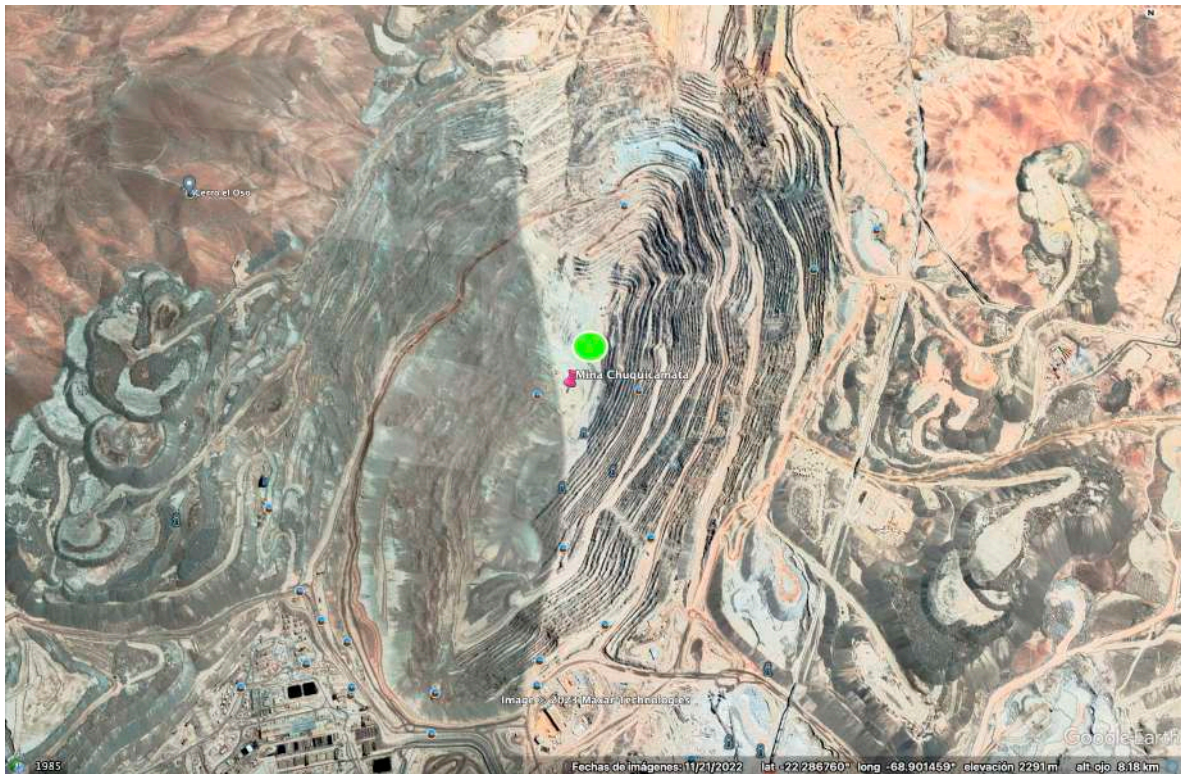


Figura 28: Medición de Elevación pie
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

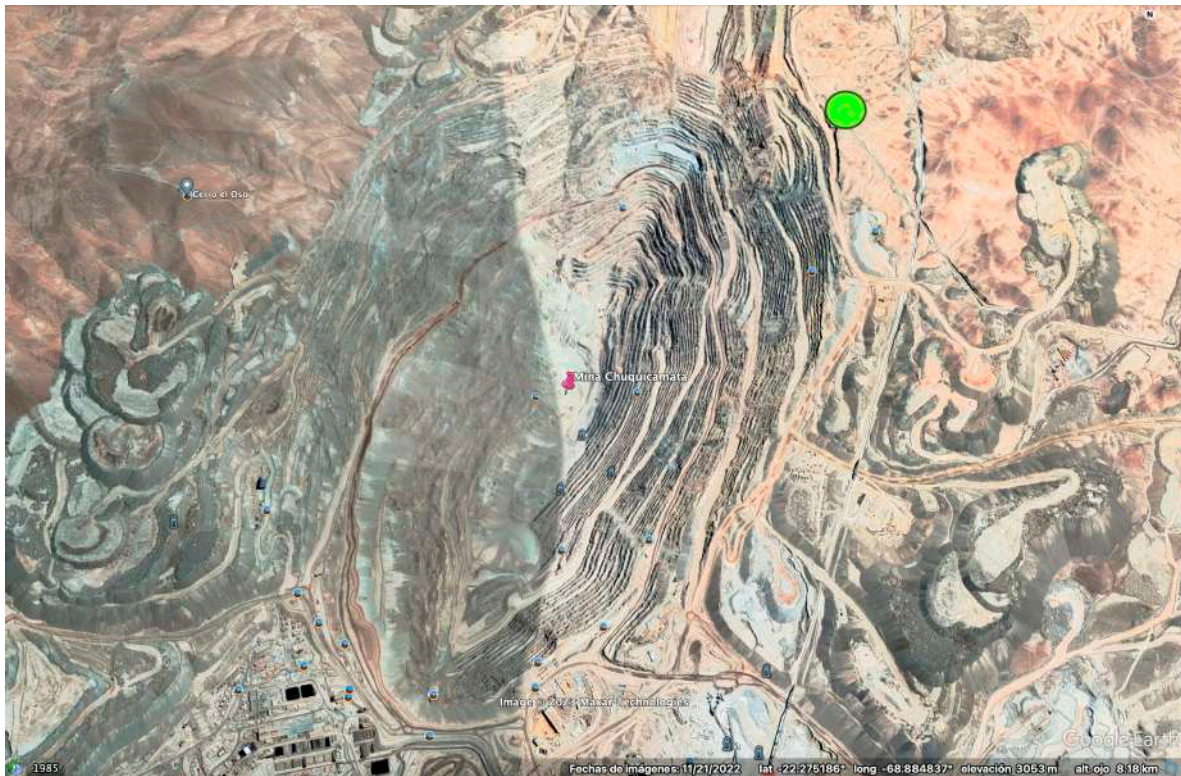


Figura 29: Medición de Elevación cresta
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 30: Medición de Perímetro y Área
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 31: Medición de Longitud de talud global
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 32: Medición de Ancho de rampa
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 33: Medición de Longitud de rampa
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 34: Medición de Altura de banco
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

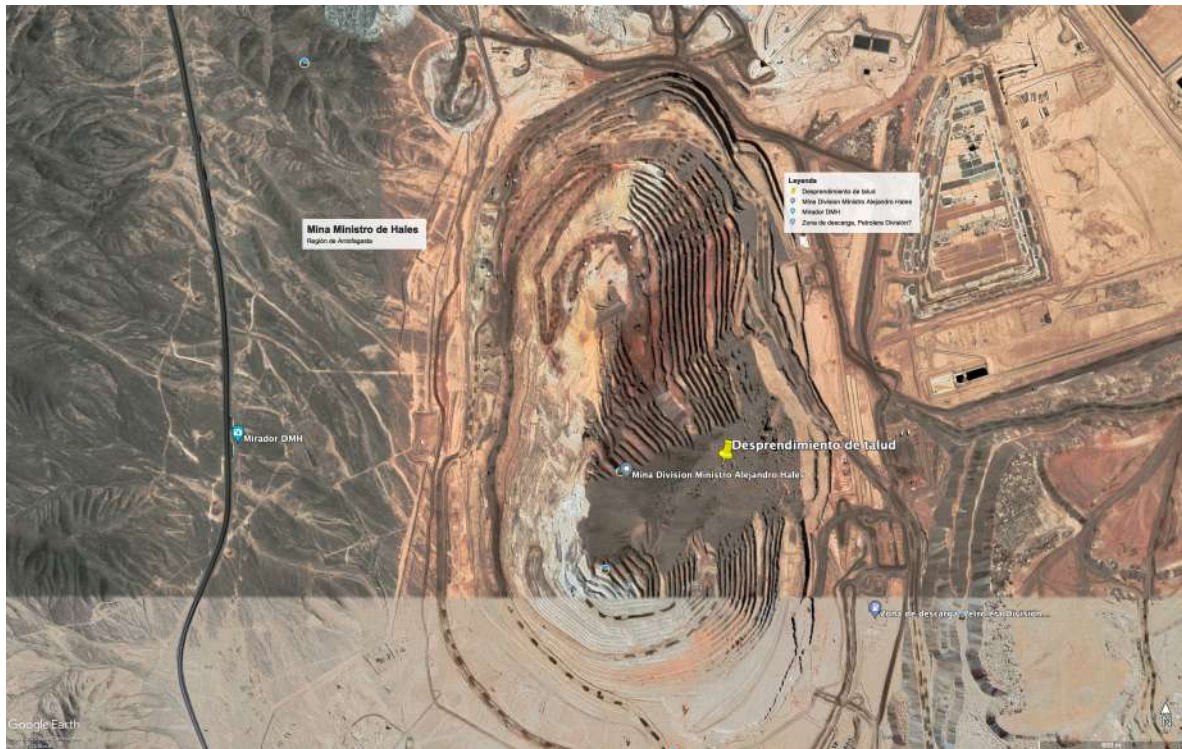


Figura 35: Medición de Desprendimiento de talud
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

Con respecto a la figura anterior, se muestran las siguientes imágenes para explicar cómo fue la categorización para los desprendimientos de talud:

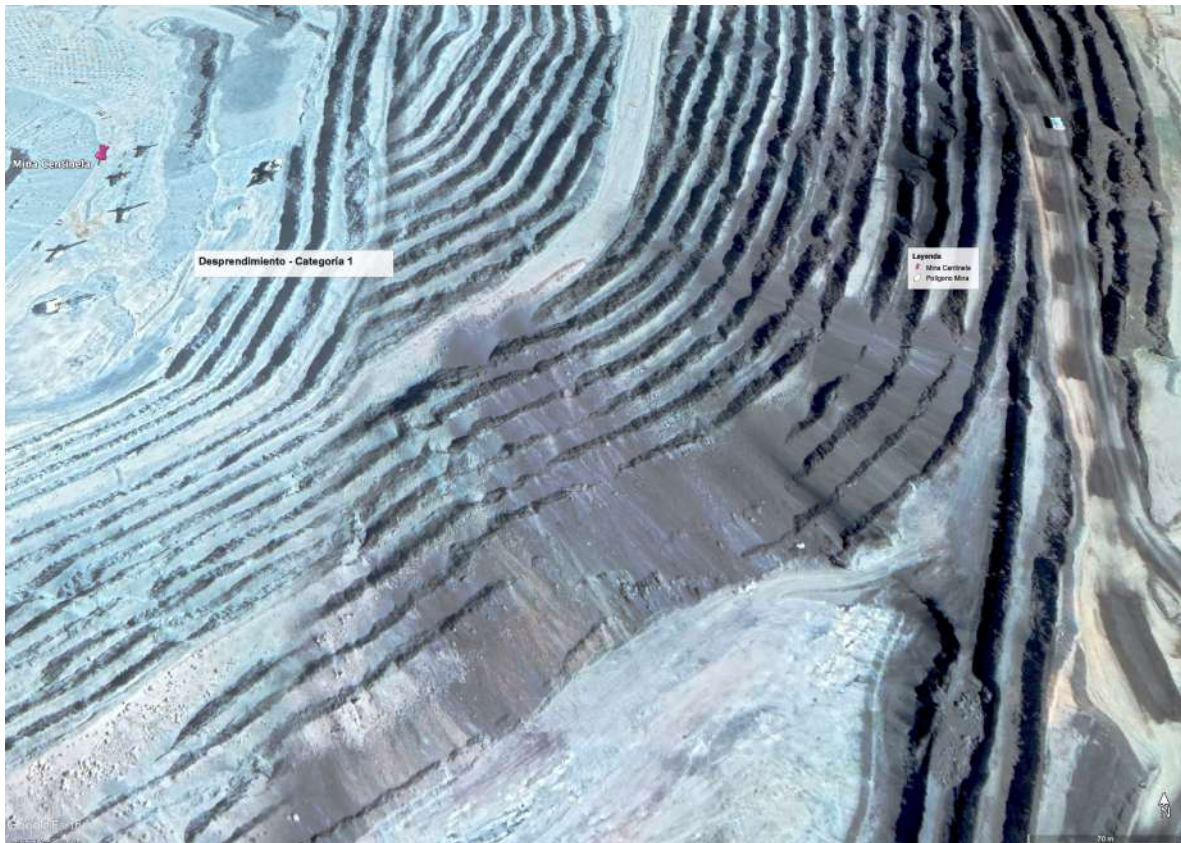


Figura 36: Medición de Desprendimiento de talud Categoría 1
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

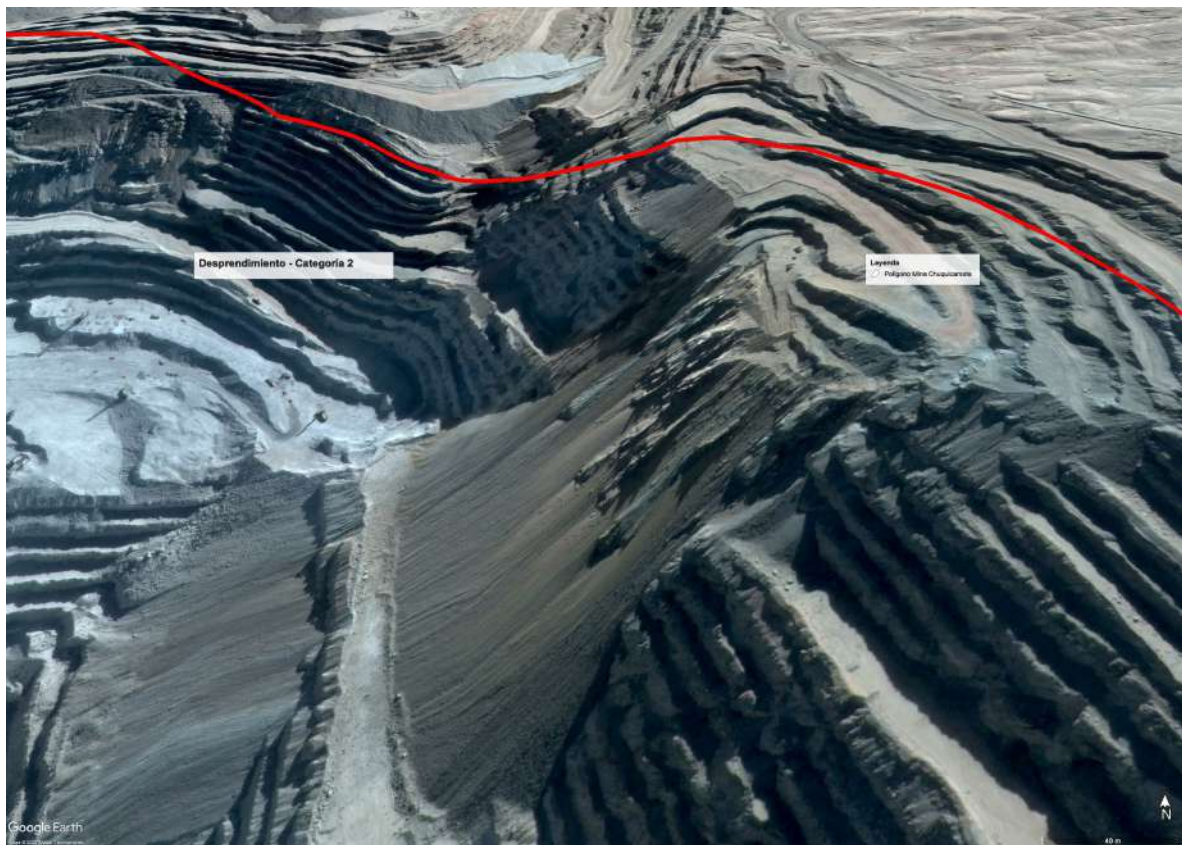


Figura 37: Medición de Desprendimiento de talud Categoría 2
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 38: Medición de Desprendimiento de talud Categoría 3
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 39: Medición de Desprendimiento de talud Categoría 4
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

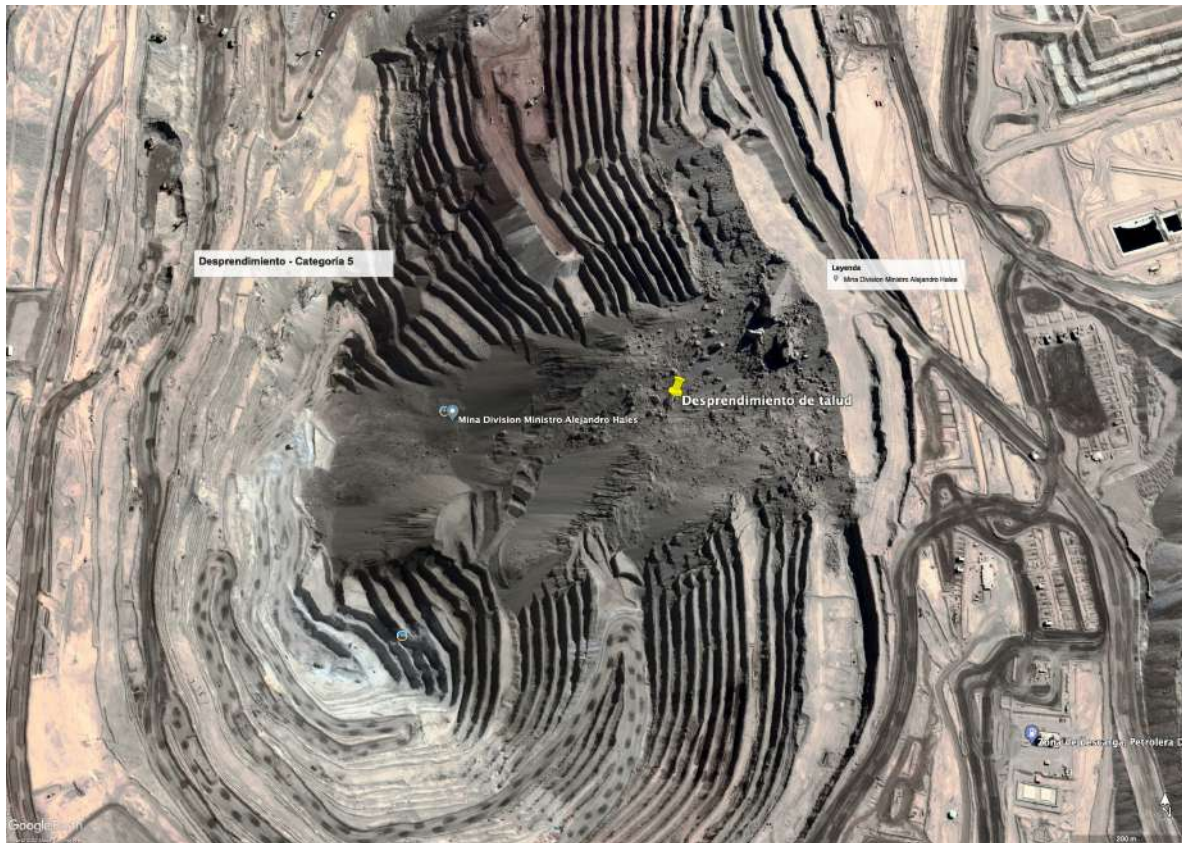


Figura 40: Medición de Desprendimiento de talud Categoría 5
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

Y por último, para explicar la medición en cómo se decidió la categorización para la variable forma se presentan las siguientes imágenes:



Figura 41: Medición de Forma Categoría 1
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 42: Medición de Forma Categoría 2
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 43: Medición de Forma Categoría 3
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 44: Medición de Forma Categoría 4
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro



Figura 45: Medición de Forma Categoría 5
Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth Pro

Anexo B: Detalle de Análisis Exploratorio de Datos de los parámetros geométricos restantes

Tabla 3: Resumen de estadísticas descriptivas de los parámetros geométricos

Variable	Count	Mean	Std	Min	Q1	Q2	Q3	Max
Longitud (m)	32	1852	975	405	1076	1673	2420	3985
Ancho (m)	32	1704	777	291	1193	1635	2383	2954
Razón elíptica	32	1	0	1	1	1	2	2
Elevación pie (m)	32	2216	1315	65	954	2352	3163	4616
Elevación cabeza (m)	32	2472	1359	129	1081	2555	3543	4718
Perímetro (m)	32	5958	2692	1288	3857	6160	7603	11588
Área (m^2)	32	2876515	2347720	107916	828407	2670998	3792911	9234071
Volumen (m^3)	32	1414408k	1688545k	12268k	212186k	892725k	1926508k	7852513k
Ángulo global (°)	32	28	9	11	22	26	33	54
Longitud de talud global (m)	32	600	343	156	296	537	914	1389
Producción (ton)	27	197700	195842	10700	53950	111400	305250	606000
Ancho de rampa (m)	32	25	6	10	20	25	30	35
Longitud de rampa (m)	32	3934	2294	427	1896	3462	5625	8469
Switchbacks	32	3	2	0	1	3	5	9
Altura de banco (m)	32	11	2	9	9	11	12	15
Profundidad (m)	32	288	159	36	162	254	365	711
Bancos	32	25	14	4	15	22	32	71
Desprendimiento de talud	32	1	1	0	0	1	2	4
Forma	32	3	1	1	2	2	3	5

Las unidades del parámetro Volumen están expresadas en K por temas de formato de la tabla.

7.0.1. Longitud de rajo

Al analizar la Tabla 3, se puede observar que la variable 'Longitud' presenta un rango que va desde 405 metros hasta 3985 metros. La media de esta variable es de 1852 metros, con una desviación estándar de 975 metros. La mediana (Q2) se encuentra en 1673 metros, mientras que el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3) corresponden a 1076 metros y 2420 metros, respectivamente. Estos valores indican que existe una variabilidad significativa en la longitud de las minas a cielo abierto en el conjunto de datos.

En cuanto a la distribución de la variable 'Longitud de rajo' en las diferentes regiones, se puede apreciar en la Figura 46 que la mayoría de las minas con una mayor longitud se concentran en la zona norte del país, particularmente en la región de Antofagasta. Le siguen en orden de tamaño de longitud las regiones de Coquimbo, Tarapacá, Metropolitana, Valparaíso, Atacama, Magallanes y Antártica Chilena, y finalmente Arica. Esta información muestra la distribución geográfica de las minas a cielo abierto y resalta la predominancia de la región de Antofagasta en este aspecto.



Figura 46: Parámetro geométrico - Longitud de rajo
Fuente: Elaboración propia

7.0.2. Ancho de rajo

El ancho de las minas a cielo abierto oscila entre 291 metros y 2954 metros, con un promedio de 1704 metros y una desviación estándar de 777 metros. La mediana (Q2) se encuentra en 1635 metros. El primer cuartil (Q1) tiene un valor de 1193 metros, mientras que el tercer cuartil (Q3) es de 2383 metros. Al igual que la longitud, el ancho también muestra una variabilidad significativa.

En relación a la distribución de la variable 'Ancho de rajo' en distintas regiones, se observa en la Figura 47 que la mayoría de las minas con mayores dimensiones se concentran en la zona norte del país. Sin embargo, a diferencia del parámetro geométrico anterior, se aprecia un cambio en la región de Tarapacá, donde las minas presentan un ancho de rajo superior al de la región de Antofagasta. Este hallazgo contrasta con la tendencia observada en el parámetro de longitud, donde se esperaría una relación similar entre ambas variables. Asimismo, resulta destacable el caso de la mina Los Pelambres en la región de Coquimbo, la cual exhibe un ancho de rajo significativamente mayor que otras minas en la misma región.



Figura 47: Parámetro geométrico - Ancho de rajo

Fuente: Elaboración propia

7.0.3. Razón elíptica

La variable 'Razón elíptica' es de naturaleza categórica y presenta valores discretos de 1 y 2. En el conjunto de datos analizado, la gran mayoría de las minas a cielo abierto exhiben una razón elíptica de 1, mientras que solo un número reducido de minas presenta una razón elíptica de 2. Esto indica que la forma elíptica con una razón de eje constante es predominante en las minas consideradas en este estudio. Esta tendencia se refleja visualmente en la Figura 48, donde se observa una distribución mayoritaria hacia el valor de 1, con una presencia minoritaria de minas con una razón elíptica de 2.



Figura 48: Parámetro geométrico - Razón elíptica

Fuente: Elaboración propia

7.0.4. Elevación pie

La elevación del punto más bajo de las minas a cielo abierto varía desde 65 metros hasta 4616 metros, con una media de 2216 metros y una desviación estándar de 1315 metros. La mediana (Q2) se encuentra en 2352 metros. Los valores del primer cuartil (Q1) y tercer cuartil (Q3) son 954 metros y 3163 metros, respectivamente. Esto indica una amplia gama de elevaciones en las minas a cielo abierto. Esto mismo se puede apreciar en la Figura 49.

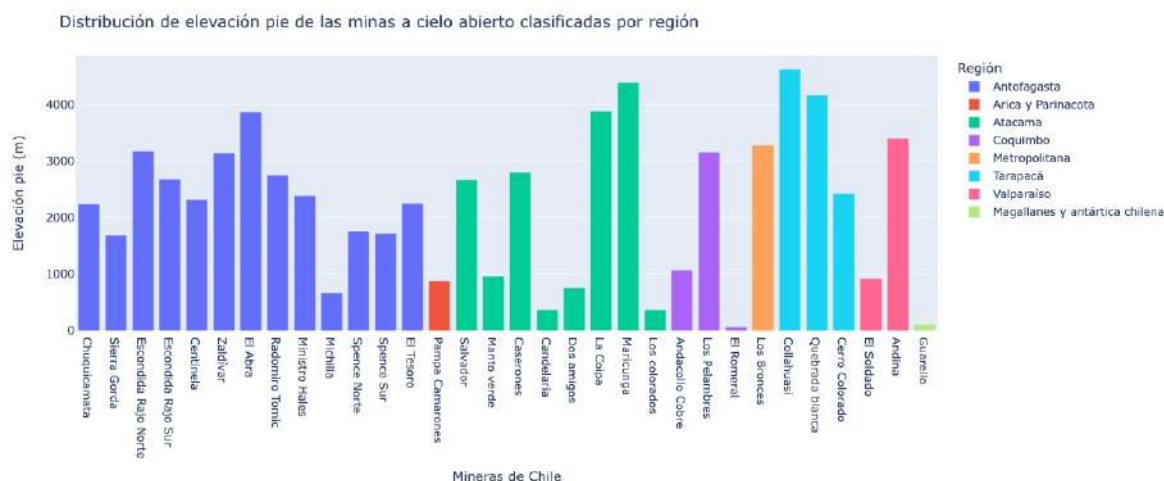


Figura 49: Parámetro geométrico - Elevación pie

Fuente: Elaboración propia

7.0.5. Elevación cresta

La elevación máxima en las minas a cielo abierto presenta una amplia gama de valores, que oscilan entre 129 metros y 4718 metros. El valor promedio de esta elevación es de 2472 metros, con una desviación estándar de 1359 metros. La mediana (Q2) se encuentra en 2555 metros, mientras que el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3) son de 1081 metros y 3543 metros, respectivamente. Similar a la elevación del pie de las minas, la elevación de la cresta muestra una notoria variabilidad en los datos.

En la Figura 50 se muestra la dispersión de la elevación de la cresta en las diferentes regiones de Chile, tal como se puede apreciar en el Gráfico adjunto. En particular, se destaca que las minas ubicadas en la región de Tarapacá exhiben las mayores latitudes geográficas.



Figura 50: Parámetro geométrico - Elevación cresta

Fuente: Elaboración propia

7.0.6. Perímetro

La magnitud de los perímetros de las minas a cielo abierto exhibe una amplia gama de valores, que oscilan desde los 1288 metros hasta los 11588 metros. La media de dichos perímetros se sitúa en 5958 metros, con una desviación estándar de 2692 metros. La mediana (Q2) se encuentra en 6160 metros, mientras que el primer cuartil (Q1) y tercer cuartil (Q3) son de 3857 metros y 7603 metros, respectivamente. Estos datos revelan una considerable variabilidad en los tamaños de los perímetros de las minas a cielo abierto.

En el Gráfico 51, se puede observar la distribución de la variable 'perímetro' en relación a las diferentes regiones. Se destaca que las minas de mayores dimensiones o de carácter masivo se concentran principalmente en la región de Antofagasta, seguidas por la mina Los Pelambres, que se destaca por sus impresionantes dimensiones. En la región de Atacama, en cambio, se encuentran las minas de menor envergadura. Cabe mencionar que la mina Collahuasi también se destaca por su tamaño significativo dentro de esta categoría.



Figura 51: Parámetro geométrico - Perímetro

Fuente: Elaboración propia

7.0.7. Ancho de rampa

El parámetro Ancho de rampa en las minas a cielo abierto muestra una variabilidad moderada en sus valores. La amplitud de los anchos de las rampas varía desde 10 metros hasta 35 metros, con un promedio de 25 metros y una desviación estándar de 6 metros. Esto indica que los anchos de las rampas no son consistentes y pueden fluctuar significativamente entre las diferentes minas estudiadas.

La mediana (Q2) de este parámetro se encuentra en 25 metros, lo que indica que el 50 % de las minas tienen un ancho de rampa igual o inferior a este valor. El primer cuartil (Q1) se sitúa en 20 metros, lo que significa que el 25 % de las minas tienen un ancho de rampa igual o inferior a 20 metros. Por otro lado, el tercer cuartil (Q3) está en 30 metros, lo que indica que el 75 % de las minas tienen un ancho de rampa igual o inferior a 30 metros.

El Gráfico 32 proporciona una visualización adicional de la distribución de los anchos de rampa en las diferentes minas a cielo abierto. La presencia de una amplia variabilidad en los anchos de rampa puede deberse a diversas razones. Por ejemplo, puede estar influenciada por el tipo de maquinaria utilizada en cada mina, ya que maquinarias más pequeñas pueden requerir rampas más estrechas. Asimismo, las políticas de seguridad de las empresas mineras pueden influir en la decisión de tener rampas más anchas, como se observa en el caso de las mineras Escondida y Collahuasi. Estas políticas buscan garantizar la seguridad de los trabajadores y la infraestructura minera.



Figura 52: Parámetro geométrico - Ancho de rampa
Fuente: Elaboración propia

7.0.8. Longitud de rampa

La longitud de la rampa en las minas a cielo abierto muestra una amplia variabilidad en sus valores. El rango de longitudes abarca desde 427 metros hasta 8469 metros, con un promedio de 3934 metros y una desviación estándar de 2294 metros. Estos datos indican que las longitudes de las rampas pueden diferir significativamente entre las diferentes minas estudiadas.

La mediana (Q2) de este parámetro se encuentra en 3462 metros, lo que significa que el 50 % de las minas tienen una longitud de rampa igual o inferior a este valor. El primer cuartil (Q1) tiene un valor de 1896 metros, lo que indica que el 25 % de las minas tienen una longitud de rampa igual o inferior a 1896 metros. Por otro lado, el tercer cuartil (Q3) se sitúa en 5625 metros, lo que indica que el 75 % de las minas tienen una longitud de rampa igual o inferior a 5625 metros.

Esta variabilidad en las longitudes de las rampas puede estar influenciada por varios factores, como la topografía del terreno, la disposición de la mina, los recursos naturales a extraer y los requerimientos operativos. Las minas que presentan longitudes más cortas pueden estar ubicadas en áreas con topografía menos accidentada o con menor extensión de recursos a extraer. Por otro lado, las minas con rampas más largas pueden requerir una infraestructura más extensa para acceder a las zonas de extracción o pueden estar ubicadas en áreas con terrenos más desafiantes.

En el Gráfico 53, se observa que la longitud de una rampa es directamente proporcional a la envergadura de la minera.

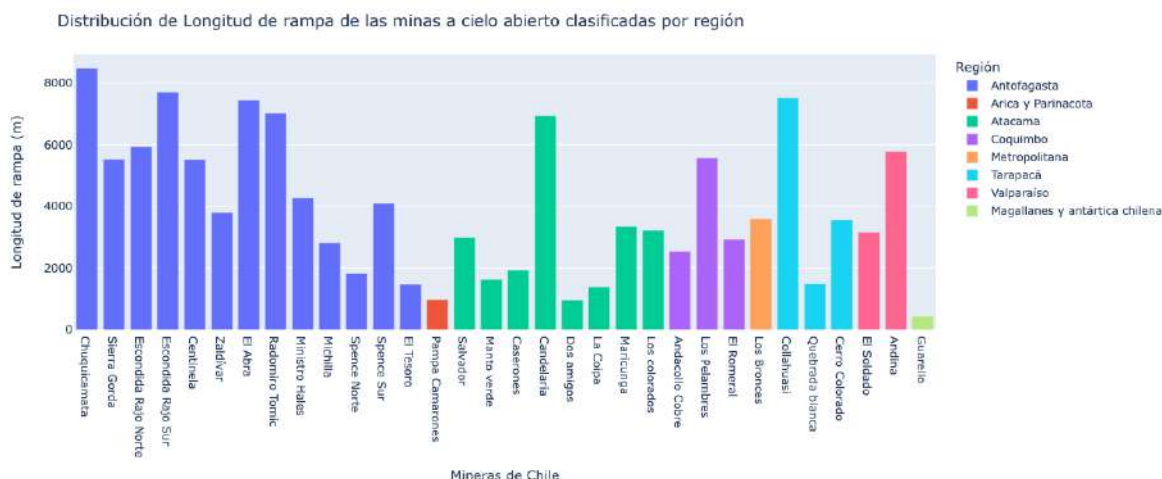


Figura 53: Parámetro geométrico - Longitud de rampa
Fuente: Elaboración propia

7.0.9. Altura de banco

La altura de los bancos en las minas a cielo abierto muestra una variabilidad moderada en sus valores. El rango de alturas abarca desde 9 metros hasta 15 metros, con un promedio de 11 metros y una desviación estándar de 2 metros. Estos datos indican que las alturas de los bancos pueden variar dentro de un rango relativamente estrecho en las diferentes minas estudiadas.

La mediana (Q2) de este parámetro se encuentra en 11 metros, lo que significa que el 50 % de las minas tienen una altura de banco igual o inferior a este valor. El primer cuartil (Q1) tiene un valor de 9 metros, lo que indica que el 25 % de las minas tienen una altura de banco igual o inferior a 9 metros. Por otro lado, el tercer cuartil (Q3) se sitúa en 12 metros, lo que indica que el 75 % de las minas tienen una altura de banco igual o inferior a 12 metros.

La variabilidad moderada en las alturas de los bancos puede deberse a varios factores, como las características geológicas del yacimiento, los métodos de extracción utilizados, las consideraciones de estabilidad del talud y los requisitos operativos. Las alturas de los bancos se seleccionan teniendo en cuenta la eficiencia de la extracción, la seguridad de los trabajadores y la estabilidad del talud. La elección de la altura óptima del banco depende de múltiples consideraciones técnicas y económicas específicas de cada mina.

En el contexto de la minería a cielo abierto en Chile, es común encontrar alturas de bancos que oscilan entre 10 y 15 metros. Este rango de alturas se ajusta a las prácticas habituales y estándares utilizados en la industria minera del país. En este estudio estadístico, se observa que la media de la altura de los bancos es de 11 metros, lo cual está en línea con las prácticas comunes en la minería chilena.

La selección adecuada de la altura del banco es crucial para garantizar una extracción eficiente y segura de los recursos minerales. La adaptación de las alturas de los bancos a las condiciones geológicas y operativas específicas de cada mina demuestra la importancia de considerar múltiples factores al determinar esta medida. En este estudio, se ha encontrado que las alturas de los bancos se encuentran dentro del rango típico observado en la industria minera chilena, lo cual respalda la coherencia de los resultados obtenidos.

A continuación, en el Gráfico 54, se puede apreciar las diferentes alturas de bancos de algunas minas en Chile.



Figura 54: Parámetro geométrico - Altura de banco
Fuente: Elaboración propia

7.0.10. Profundidad

La profundidad de las minas a cielo abierto muestra una variabilidad en sus valores, abarcando desde 36 metros hasta 711 metros. El promedio de profundidad es de 288 metros, con una desviación estándar de 159 metros. Estos datos indican que las minas a cielo abierto pueden tener diferentes niveles de profundidad, lo cual implica variaciones significativas en términos de excavación y extracción de materiales.

La mediana (Q2) de este parámetro se encuentra en 254 metros, lo que significa que el 50 % de las minas tienen una profundidad igual o inferior a este valor. El primer cuartil (Q1) tiene un valor de 162 metros, lo que indica que el 25 % de las minas tienen una profundidad igual o inferior a 162 metros. Por otro lado, el tercer cuartil (Q3) se sitúa en 365 metros, lo que indica que el 75 % de las minas tienen una profundidad igual o inferior a 365 metros.

La variabilidad en las profundidades de las minas a cielo abierto puede deberse a diversas razones, como las características geológicas del yacimiento, los objetivos de extracción, los recursos minerales presentes y las consideraciones técnicas y económicas. La elección de

la profundidad de una mina a cielo abierto se basa en una evaluación exhaustiva de estos factores, teniendo en cuenta la viabilidad económica, la seguridad de los trabajadores y la eficiencia de la operación.

Es importante destacar que las profundidades obtenidas en este estudio reflejan la realidad de las minas a cielo abierto analizadas. Sin embargo, es posible que existan minas a cielo abierto con profundidades fuera del rango reportado, ya que cada yacimiento tiene características únicas que influyen en su profundidad.

A continuación, se presenta el Gráfico 55 el cual muestra la profundidad de las minas a cielo abierto de algunas minas de Chile.

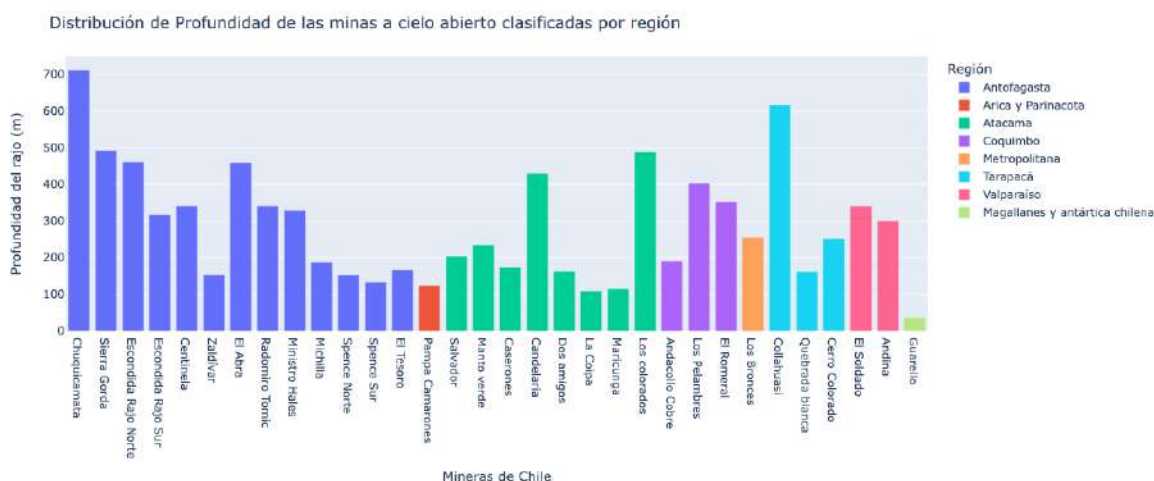


Figura 55: Parámetro geométrico - Profundidad

Fuente: Elaboración propia

7.0.11. Cantidad de bancos

El número de bancos en las minas a cielo abierto muestra una variabilidad moderada en sus valores, oscilando desde 4 hasta 71 bancos. El promedio de bancos es de 25, con una desviación estándar de 14. Estos datos indican que la cantidad de bancos puede variar significativamente entre las minas a cielo abierto estudiadas.

La mediana (Q2) de este parámetro se encuentra en 22, lo que significa que el 50 % de las minas tienen un número de bancos igual o inferior a este valor. El primer cuartil (Q1) tiene un valor de 15, lo que indica que el 25 % de las minas tienen un número de bancos igual o inferior a 15. Por otro lado, el tercer cuartil (Q3) se sitúa en 32, lo que indica que el 75 % de las minas tienen un número de bancos igual o inferior a 32.

La variabilidad moderada en la cantidad de bancos en las minas a cielo abierto puede estar relacionada con varios factores, como las características geológicas del yacimiento, los méto-

dos de extracción utilizados y los objetivos de producción. El número de bancos se selecciona teniendo en cuenta consideraciones técnicas, económicas y operativas para garantizar una extracción eficiente y segura de los recursos minerales.

En el Gráfico 56, se observa que existe una proporcionalidad directa entre la profundidad y la cantidad de bancos. Un claro ejemplo es la mina Chuquicamata, el cual consta de una profundidad de más de 800 metros y una cantidad de bancos de 70 aproximadamente.



Figura 56: Parámetro geométrico - Cantidad de bancos

Fuente: Elaboración propia

7.0.12. Forma

La forma de las minas a cielo abierto se representa mediante valores discretos que van del 1 al 5, correspondiendo a diferentes tipos de formas: 1 representa 'Círculo', 2 representa 'Elipse', 3 representa 'Hexágono', 4 representa 'Rajo' y 5 representa 'Estrella'.

En el conjunto de datos analizado, se observa que los valores más comunes para la forma de las minas son 2 y 3, lo que indica que las formas predominantes son elípticas y hexagonales. La media de forma es de 3, lo que sugiere una tendencia hacia formas más complejas en general. La desviación estándar de 1 indica que existe cierta variabilidad en las formas de las minas a cielo abierto.

La mediana (Q2) también se encuentra en 3, lo que significa que el 50 % de las minas tienen una forma igual o inferior a este valor. Esto indica que hay una distribución equilibrada de las diferentes formas en las minas estudiadas.

El rango de valores de forma, desde 1 hasta 5, refleja la diversidad de características de forma presentes en las minas a cielo abierto. Las formas más simples, como círculos y elipses, coexisten con formas más complejas, como hexágonos, rajos y estrellas. Esta variabilidad en

la forma puede estar influenciada por diferentes factores, como las condiciones geológicas, los métodos de extracción utilizados y las consideraciones operativas y de seguridad.

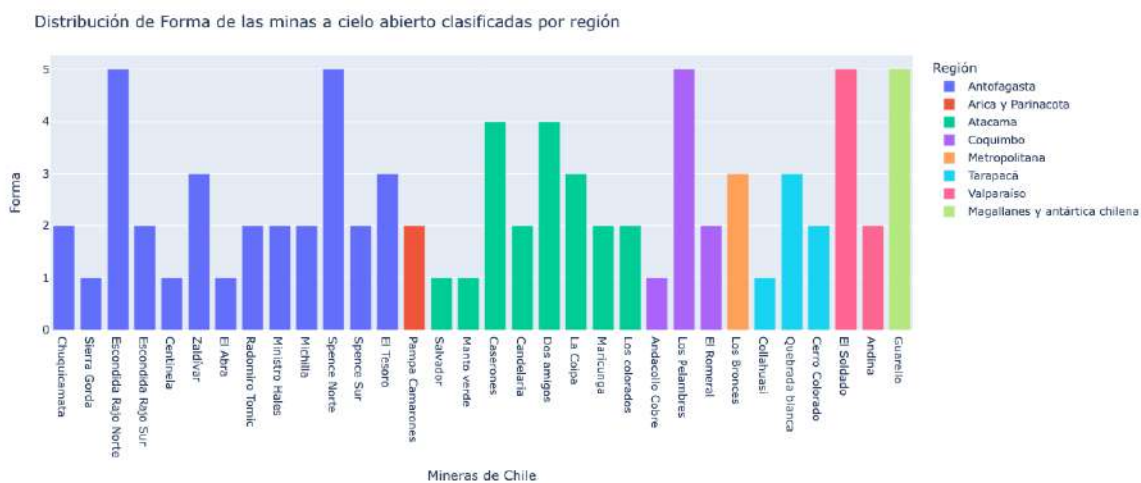


Figura 57: Parámetro geométrico - Forma
Fuente: Elaboración propia

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Alfaro, 2009] Alfaro, M. A. (2009). Efecto de aplicación de leyes de corte en el cálculo de un programa de producción. https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103387/cf-alfaro_mc.pdf?sequence=3&isAllowed=y.
- [Alier, 2015] Alier, M. (2015). Algunos apuntes acerca de la megaminería a cielo abierto. Eco MDP. <https://eco.mdp.edu.ar/institucional/eco-enlaces/1378-algunos-apuntes-acerca-de-la-megamineria-a-cielo-abierto>.
- [Ataei y Osanloo, 2016] Ataei, M. y Osanloo, M. (2016). Application of clustering techniques to evaluate mineral potential: A case study of the zanzan area, iran. *Natural Resources Research*, 25(4):429–442.
- [Ayatollahi et al., 2019] Ayatollahi, S., Khalokakaie, R., Jolai, F., y Osanloo, M. (2019). Clustering-based method for mine production scheduling. *Resources Policy*, 62:454–464.
- [Banerjee, 2020] Banerjee, P. (2020). K-means clustering with python. Kaggle. Recuperado el 5 de junio de 2023 de <https://www.kaggle.com/code/prashant111/k-means-clustering-with-python/notebook>.
- [Batista y Monard, 2003] Batista, G. E. y Monard, M. C. (2003). An analysis of four missing data treatment methods for supervised learning. *Applied Artificial Intelligence*, 17(5-6):519–533.
- [Bishop, 2006] Bishop, C. M. (2006). Pattern recognition and machine learning. *Machine Learning*, 128(1-2):3–4.
- [Carver y Weiss, 2013] Carver, D. y Weiss, D. (2013). Clustering techniques for mineral prospectivity mapping: A comparative study. *Natural Resources Research*, 22(3):233–248.
- [Charrad et al., 2014] Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., y Niknafs, A. (2014). Nbclust: An r package for determining the relevant number of clusters in a data set. *Journal of Statistical Software*, 61(6):1–36.
- [Chebair y Yanes, 2020] Chebair, J. y Yanes, E. (2020). *Módulo II: Seguridad en Minería*. Curso experto en prevención de riesgo de la industria extractiva minera nacional edición.
- [COCHILCO, 2022] COCHILCO (2022). Proyección de la producción esperada de cobre 2022-2033. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Proyecci%C3%B3n%20de%20la%20producci%C3%B3n%20esperada%20de%20cobre%202022-2033.pdf>.
- [COCHILCO, 2023] COCHILCO (2023). Consejo minero a partir de información de cochilco. <https://consejominero.cl/mineria-en-chile/cifras-actualizadas-de-la-mineria/>.

- [Díaz Pizarro, 2017] Díaz Pizarro, C. A. (2017). Planificación minera a cielo abierto considerando diseño óptimo de rampas. Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas, Universidad de Chile, Santiago.
- [Gajardo, 2021] Gajardo, R. (2021). *Diseño de una mina a cielo abierto utilizando redes neuronales de perceptrón multicapa*. Memoria para optar al título de ing. civil de minas, Universidad de Talca, Curicó.
- [Gholinejad et al., 2021] Gholinejad, M., Moosavi, V., y Karamoozian, M. (2021). Cluster analysis for optimal blast design in open-pit mining. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(3):593–602.
- [González, 2021] González, R. (2021). Diseño de una mina a cielo abierto utilizando redes neuronales de base radial. Universidad de Talca.
- [Géron, 2019] Géron, A. (2019). *Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472. Copyright © 2019 Aurélien Géron. All rights reserved. Printed in the United States of America. O'Reilly books may be purchased for educational, business, or sales promotional use. Online editions are also available for most titles (<http://oreilly.com>). For more information, contact our corporate/institutional sales department: 800-998-9938 or corporate@oreilly.com.
- [Hu et al., 2022] Hu, B., Hu, S., Yang, J., Zou, H., y Zhang, F. (2022). Application of clustering algorithms in mining exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 236:106–117.
- [Hustrulid et al., 2013] Hustrulid, W. A., Kuchta, M., y Martin, R. (2013). *Open Pit Mine Planning & Design*. CRC Press / Balkema, 3rd revised and extended edición.
- [Jimenez del Valle, 2014] Jimenez del Valle, B. (2014). Criterios de definición de fases y diseño en minería a cielo abierto. Santiago.
- [Kumar y Dimitrakopoulos, 2021] Kumar, A. y Dimitrakopoulos, R. (2021). Production scheduling in industrial mining complexes with incoming new information using tree search and deep reinforcement learning. *Journal Name*, Volume Number(Issue Number):Page Range. Received: 7 May 2020, Received in revised form: 9 November 2020, Accepted: 19 June 2021, Available online: 30 June 2021.
- [Kumar et al., 2020] Kumar, A., Dimitrakopoulos, R., y Maulen, M. (2020). Adaptive self-learning mechanisms for updating short-term production decisions in an industrial mining complex. *Journal Name*, Volume Number(Issue Number):Page Range. Received: 26 March 2019, Accepted: 16 March 2020, Published online: 2 April 2020.
- [Little y Rubin, 2019] Little, R. J. y Rubin, D. B. (2019). *Statistical analysis with missing data*. John Wiley & Sons.

- [MacQueen, 1967] MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1:281–297.
- [MINMINERIA, 2022] MINMINERIA (2022). Decreto 30. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Recuperado el 5 de junio de 2023 de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1173011&idParte=10312677&idVersion=2022-02-23>.
- [Moreno, 2019] Moreno, R. (2019). *Metodología para diseño de rampas en base a análisis conjunto*. Memoria para optar al título de ing. civil de minas, Universidad de Talca, Curicó.
- [Ramirez, 2018] Ramirez, J. (2018). K-means: Elbow method and silhouette. Medium. Publicado el Dec 25, 2018. Recuperado el 8 de junio de 2023 de <https://medium.com/@username/article-title-1234567890>.
- [Recalde, 2007] Recalde, E. (2007). Metodología de planificación minera a corto plazo y diseño minero a mediano plazo en la cantera pifo. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53017>.
- [Russell y Norvig, 2016] Russell, S. J. y Norvig, P. (2016). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson, United States.
- [Saavedra et al., 2018] Saavedra, A., Verdel, T., y Salamanca, M. (2018). Cluster analysis for geological modeling and resource estimation in a coal deposit. *Natural Resources Research*, 27(3):383–395.
- [Salman et al., 2021] Salman, S., Muhammad, K., Khan, A., y Glass, H. J. (2021). A block aggregation method for short-term planning of open pit mining with multiple processing destinations. *Minerals*, 11(3):288. Received: 3 February 2021, Accepted: 5 March 2021, Published: 10 March 2021.
- [SONAMI, 2012] SONAMI (2012). Chile país minero. <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/06/Chile-Pais-Minero-SONAMI-El-Mercurio.pdf>.
- [Wang y Wang, 2020] Wang, X. y Wang, F. (2020). The precision of google earth map analysis with the coordinates of igs stations. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W10:1053–1056.
- [Wang et al., 2017] Wang, Z., Cheng, Q., y Wang, W. (2017). Application of clustering analysis for mineral resource classification. *Natural Resources Research*, 26(2):243–257.
- [Yang et al., 2020] Yang, Y., Li, C., Zhou, Z., y Luo, Y. (2020). Application of clustering techniques for grade estimation in an iron ore deposit. *Journal of Applied Geophysics*, 180:104108.