Modelo geoestadístico en SIG para la estimación de reservas de oro en vetas del Nordeste de Antioquia

Pedro Pablo López Gómez

María Andrea Montoya Montoya

Laura Sofía Suaza Muñoz

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Programa Académico

Manizales, 2025

Resumen

Las reservas minerales constituyen uno de los insumos principales para proyectos mineros, estas se usan en múltiples etapas y son claves para determinar la factibilidad y garantizar la continuidad de estos. En la actualidad existen diferentes metodologías muy precisas, pero a la vez de alta complejidad, lo que obliga en muchos casos a recurrir a métodos tradicionales, obteniéndose resultados deficientes y afectando de manera directa el desarrollo de los proyectos mineros. El objetivo principal del estudio es generar una alternativa para el cálculo de reservas en depósitos de oro en vetas, con la cual se garantice obtener información de calidad por medio de métodos menos complejos, a partir del uso de herramientas SIG.

El proyecto se divide en cuatro etapas. La primera consiste en revisar las diversas metodologías existentes para el cálculo de reservas. Posteriormente, se desarrolla un procedimiento utilizando herramientas SIG, que incluyen métodos de interpolación y análisis geoestadísticos, considerando la variabilidad espacial característica del tipo de depósito en estudio. Para optimizar el proceso y mejorar su eficiencia, este se automatiza mediante modelos de geoprocesamiento como Model Builder o Model Designer. Finalmente, se realiza una prueba piloto para validar el funcionamiento del procedimiento a través de los diferentes software, lo que permite determinar cuál es el más adecuado para una futura implementación.

Como resultado final se obtuvo un procedimiento para cálculo de reservas esquematizado a través de un modelo de geoprocesamiento aplicable tanto en ARCGIS como en QGIS, con el cual se logra optimizar los tiempos de procesamiento y obtener reportes de reservas de calidad, con ventajas significativas en términos de precisión y visualización en comparación con los métodos convencionales.

Palabras clave: Depósitos de oro en vetas, reservas minerales, cálculo de reservas, SIG, modelos de geoprocesamiento, modelo geoestadístico.

Abstract

Mineral reserves constitute one of the main inputs for mining projects; these are used in multiple stages and are key to determining the feasibility and guaranteeing continuity of the project. Nowadays, there are extremely accurate methodologies, but at the same time complex, this forces us to use traditional methods, obtaining poor results and affecting the development of mining projects. The main objective of the study is to generate an alternative for calculating reserves in Vein-type gold deposits, obtaining quality information through easier methods, using GIS tools.

The project is divided into four stages. The first stage involves reviewing the existing methodologies for reserve calculation. Next, a procedure is developed using GIS tools, incorporating interpolation methods and geostatistical analysis, considering the spatial variability characteristic of the deposit type under study. To improve process efficiency, the procedure is automated using geoprocessing models such as Model Builder or Model Designer. Finally, a pilot test is carried out to validate the efficiency of the process through the different software, allowing determinate the most suitable option for future implementation.

The final outcome is a reserve calculation procedure developed through a geoprocessing model compatible with both ARCGIS and QGIS. This approach streamlines processing times and produces accurate, high-quality reserve reports, providing notable improvements in precision and visualization when compared to traditional methods.

Keywords: Vein-type gold deposits, mineral reserves, reserve calculation, GIS, geoprocessing models, geostatistical model.

Contenido

Pág.

1. INTRODUCCIÓN IX

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN 11

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA 11
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 14
2.3 JUSTIFICACIÓN 15

3. OBJETIVOS 17

3.1 OBJETIVO GENERAL 17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17

4. ANTECEDENTES 18

5. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL 27

6. REFERENTE TEÓRICO 29

7. METODOLOGÍA 36

7.1 ENFOQUE METODOLÓGICO 37
7.2 TIPO DE ESTUDIO 37
7.3 PROCEDIMIENTO 38

8. RESULTADOS 45

8.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS PARA CÁLCULO DE RESERVAS DE ORO 45
8.2 ELECCIÓN DE SOFTWARE 47
8.3 DESARROLLO DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE RESERVAS MEDIANTE INTERPOLACIÓN GEOESTADÍSTICA 48
8.4 AUTOMATIZACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE RESERVAS 58
8.5 RESULTADOS DE LA PRUEBA PILOTO DE IMPLEMENTACIÓN DE PROCEDIMIENTO AUTOMATIZADO PARA CÁLCULO DE RESERVAS 64

9. DISCUSIÓN 73

10. CONCLUSIONES 75

11. RECOMENDACIONES 78

12. REFERENCIAS 80

Lista de figuras

Pág.

FIGURA 1 *DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS CANALES DE MUESTREO QUE CONFORMAN LA BASE DE DATOS, CON SUS VALORES DE ORO CORRESPONDIENTES.* 49
FIGURA 2 *INTERPOLACIÓN EMPIRICAL BAYESIAN KRIGING - ADVANCED EN ARCGIS PARA EL TENOR DE LA VETA.* 50
FIGURA 3 *TENDENCIA DEL ORESHOOT EN EL RÁSTER DE TENOR DILUIDO.* 51
FIGURA 4 *INTERPOLACIÓN CON MACHINE LEARNING EN QGIS PARA EL TENOR, EN LA IMAGEN SE OBSERVA LA RESTRICCIÓN DE LA HERRAMIENTA EN CUANTO AL ÁREA DE TRABAJO.* 52
FIGURA 5 *VARIOGRAMA DEL ESPESOR EN KRIGING ORDINARIO EN QGIS.* 53
FIGURA 6 *INTERPOLACIÓN DEL ESPESOR EN KRIGING ORDINARIO EN QGIS.* 53
FIGURA 7 *INTERPOLACIÓN DE ESPESOR DE VETA, MÉTODO EMPIRICAL BAYESIAN KRIGING – ADVANCED ARCGIS* 54
FIGURA 8 *INTERPOLACIÓN KRIGING EN ARCGIS PRO DE LA ALTURA Y RASTER DE BUZAMIENTO.* 55
FIGURA 9 *CÁLCULOS A PARTIR DE ARCHIVOS TIPO RÁSTER REALIZADOS EN ARCGIS PRO.* 56
FIGURA 10 *EJEMPLO DE CÁLCULO DE ONZAS EN QGIS.* 56
FIGURA 11 *MODELO DE GEOPROCESAMIENTO EN ARCGIS PARA CÁLCULO DE RESERVAS MINERAS.* 60
FIGURA 12 *MODELO DE GEOPROCESAMIENTO EN QGIS PARA CÁLCULO DE RESERVAS MINERAS.* 61
FIGURA 13 *BLOQUES SELECCIONADOS PARA REALIZAR LAS PRUEBAS PILOTO.* 65
FIGURA 14 *REPORTE DE RESERVAS GENERADO EN EL SOFTWARE ARCGIS PRO.* 65
FIGURA 15 *REPORTE DE RESERVAS GENERADO EN EL SOFTWARE QGIS.* 66
FIGURA 16 *INTERPOLACIONES DE TENOR DE VETA ARCGIS PRO VS LEAPFROG.* 68
FIGURA 17 *INTERPOLACIONES DE TENOR DE VETA QGIS VS LEAPFROG.* 69
FIGURA 18 *INTERPOLACIONES DE TENOR DE CORTE ARCGIS PRO VS LEAPFROG.* 69
FIGURA 19 *INTERPOLACIONES DE TENOR DE CORTE QGIS VS LEAPFROG.* 70
FIGURA 20 *INTERPOLACIONES DE TENOR DE CORTE CON CUTOFF DE 3G/TON ARCGIS VS LEAPFROG.* .. 71
FIGURA 21 *INTERPOLACIONES DE TENOR DE CORTE CON CUTOFF DE 3G/TON QGIS VS LEAPFROG.* 71

Lista de tablas

Pág.

TABLA 1 ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS 40
TABLA 2 MATRIZ DE PONDERACIÓN DE SOFTWARE SIG 47
TABLA 3 REPORTE DE RESERVAS GENERADO EN EL SOFTWARE LEAPFROG 67

1. Introducción

El cálculo de reservas minerales es un proceso crucial en la industria minera, ya que permite estimar la cantidad de recursos disponibles y su distribución espacial. En depósitos de oro en vetas, caracterizados por su geometría irregular y alta variabilidad en el contenido de mineral, la estimación precisa de reservas se vuelve especialmente desafiante. Los métodos tradicionales de cálculo suelen depender de aproximaciones simplificadas que no consideran adecuadamente la variabilidad espacial del tenor y el espesor de la veta, lo cual puede llevar a estimaciones poco confiables y afectar la planificación minera.

En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las metodologías geoestadísticas emergen como herramientas poderosas para mejorar la precisión y reducir la incertidumbre en la estimación de reservas. La capacidad de los SIG para gestionar grandes volúmenes de datos georreferenciados, combinada con métodos de interpolación geoestadística, permite modelar de manera más realista la distribución espacial de las variables clave, como el tenor de oro y el espesor de la veta. Esto es particularmente relevante en depósitos de oro en vetas, donde la distribución del contenido mineral tiende a ser altamente errática y con tendencias complejas.

El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar un modelo geoestadístico en un SIG para el cálculo de reservas en depósitos de oro en vetas, enfocándose en mejorar la precisión de las estimaciones y optimizar el proceso mediante la automatización de flujos de trabajo. Para ello, se integran herramientas de interpolación geoestadística y procesamiento espacial en ArcGIS Pro y QGIS, comparando su efectividad en términos de precisión y eficiencia. Asimismo, se incorpora una metodología automatizada mediante modelos de geoprocesamiento,

utilizando ModelBuilder y Modeler Designer, para estandarizar el procedimiento y minimizar la intervención manual.

Con la implementación de este modelo, se espera obtener estimaciones más precisas y confiables de las reservas, al mismo tiempo que se agiliza el proceso de cálculo. La validación del modelo se realiza en el distrito minero de Segovia – Remedios, una región reconocida por su alta producción de oro en vetas en el nordeste de Antioquia, Colombia. Los resultados se comparan con métodos convencionales y con datos de producción real, evaluando la efectividad de la metodología propuesta y su potencial aplicación en otros proyectos mineros con características similares.

2. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

2.1 Descripción del área problemática

Conforme la minería se convirtió en una industria cada vez más desarrollada y competitiva, surgió la necesidad de determinar con precisión la cantidad de mineral disponible o también conocido como el cálculo de reservas (Meza, 2017). En este contexto, el cálculo de reservas es un proceso que ha evolucionado de la mano con los avances tecnológicos, convirtiéndose en una herramienta crucial para la toma de decisiones sobre la explotación mineral a lo largo de toda la vida productiva de un proyecto. Por lo tanto, es fundamental que los métodos utilizados en este proceso estén estandarizados para garantizar la coherencia entre diferentes proyectos y yacimientos (Meza, 2017).

El cálculo de reservas mineras es uno de los insumos más importantes para la ejecución de un proyecto minero, esta información es base para muchos de los procesos que conlleva la puesta en marcha de estos, usándose desde la etapa de factibilidad hasta la etapa de explotación.

En la actualidad, existen diferentes métodos de cálculo avanzados los cuales integran potentes software SIG, geoestadística, machine learning, entre otros, generando modelos de reservas acertados y permitiendo realizar una planificación precisa, optimizando los procesos, incrementando las ganancias y alargando la vida de los diferentes proyectos mineros. Sin embargo, las metodologías actuales de cálculo de reservas mineras consisten en métodos complejos, que necesitan de profesionales expertos en el tema además de software especializados

costosos (Cueva, 2023), esto ha generado que muchas de las empresas obtengan esta información de manera poco frecuente por medio de consultoras externas y que las pequeñas empresas con pocos recursos, en definitiva no puedan acceder a estos, generando problemas principalmente en la planificación correcta de la explotación (León, 2017) y volviendo los proyectos insostenibles.

Debido a lo mencionado anteriormente y como alternativa, en los proyectos de minería subterránea de vetas, específicamente en el Nordeste de Antioquia se ha optado por realizar los cálculos de reservas por métodos convencionales, manuales y poco precisos. Estos métodos, como lo es el método geométrico poligonal, presentan limitaciones significativas que aumentan la incertidumbre de los datos calculados (Universidad Nacional de San Juan, s.f.). Es importante resaltar las desventajas que surgen al no considerar la irregularidad de los cuerpos mineralizados y la complejidad en la distribución espacial de los recursos minerales (Tolentino, 2019). Por ejemplo, al suponer que la variabilidad espacial de las concentraciones de minerales es estacionaria y al omitir variables geológicas como cambios litológicos, geología estructural o alteraciones minerales, se pierde información valiosa sobre la distribución del mineral y se corre el riesgo de obtener estimaciones imprecisas. Asimismo, el enfoque convencional de cálculo de reservas demanda una considerable cantidad de tiempo y recursos humanos.

La percepción errónea de que los métodos geométricos poligonales son suficientes para calcular reservas de forma precisa ha dado lugar a errores en la estimación. Estos errores incluyen resultados poco realistas, falta de correlación entre los datos, sesgo en el espesor real de veta y distribución de los tenores, y errores en los cálculos de tonelaje. Esto puede llevar a una subestimación o sobreestimación de la cantidad de oro, lo que implica retrasos en la toma de decisiones estratégicas que pueden causar dificultades en la planificación y ejecución del

minado, así como una extracción excesiva o insuficiente del mineral, afectando la viabilidad o la rentabilidad de un proyecto.

Para el planeamiento a corto plazo que se realiza por periodos, incluso semanales, es requerida esta información lo más actualizada posible (León, 2017), no siendo suficiente los modelos de reservas suministrados para periodos largos de tiempo y generando la necesidad de buscar una alternativa más precisa que los métodos convencionales, pero a su vez con menor complejidad respecto a las metodologías actuales de cálculo de reservas a partir de la generación de modelos de bloques.

Por tanto, es necesario investigar una solución mediante una metodología de cálculo de reservas en vetas del Nordeste de Antioquia, por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG), de preferencia un software libre. Este enfoque permitirá emplear métodos de interpolación para la obtención de un modelo más acertado, que considere las variables espaciales presentes en el depósito. Mediante la presente investigación, se pretende automatizar el proceso con herramientas como lo son los modelos de geoprocesamiento (Esri, s.f), que se encuentran en los software modernos, los cuales, a través de una interfaz gráfica simple e intuitiva interconectan los procesos (QGIS Development Team, s.f.), disminuyendo así los tiempos utilizados para la elaboración y facilitando la actualización frecuente de la información. La elección de un software libre es una alternativa de acceso gratuito, con el fin de disminuir costos y brindar accesibilidad a este tipo de procesos en proyectos mineros pequeños con menor poder adquisitivo.

2.2 Formulación del problema

La minería subterránea de vetas de oro enfrenta un desafío, la inexactitud e incertidumbre en el cálculo de las reservas de oro, debido a cuatro factores interrelacionados.

El primer factor se relaciona con la implementación de métodos tradicionales, como el método geométrico poligonal. Este método es utilizado por la familiaridad con los cálculos manuales, por la falta de conocimiento y complejidad para utilizar modelos matemáticos más precisos, y también por la dificultad de automatizar estos procesos.

El segundo factor es el tiempo limitado para realizar un modelo robusto. Esto se debe a la falta de capacitación en el uso de herramientas SIG y técnicas de interpolación, así como el alcance limitado y dificultad de acceso a software especializados.

El tercer factor corresponde a la simplificación de la forma y distribución real del oro dentro del depósito, debido a la dificultad de modelar la distribución espacial del oro en la veta. Además, existe la percepción errónea de que las leyes de los minerales varían de manera continua en el espacio, es decir, se asume una estacionariedad (continuidad). Por último, al simplificar, se omiten los diferentes tipos de rocas, estructuras y procesos geológicos que podrían dar lugar a variaciones abruptas en la ley del mineral.

Como cuarto aspecto está la disponibilidad limitada y baja calidad de datos, debida a problemas en la obtención y el almacenamiento de estos.

Los aspectos mencionados influyen de manera negativa en factores como la precisión en los cálculos, generando subestimación o sobreestimación de reservas, así mismo la ausencia de herramientas que permitan visualizar y analizar la información geoespacial de manera íntegra

representa un impacto significativo en la toma de decisiones estratégicas, la planificación y ejecución de las operaciones mineras. Por esta razón, la investigación se basa en la siguiente pregunta: ¿Cómo se pueden abordar la inexactitud y la incertidumbre en el cálculo de las reservas de vetas de oro en el sector de minería subterránea en el nordeste del departamento de Antioquia utilizando sistemas de información geográfica?

2.3 Justificación

El desarrollo de un modelo geoestadístico en SIG para la estimación de reservas de oro en vetas del Nordeste de Antioquia busca superar las limitaciones de los métodos tradicionales y aumentar la precisión en el cálculo, mediante el análisis de la variabilidad espacial de los recursos minerales. Este enfoque además de dar una solución practica de un problema real de la industria minera, también explora el potencial de los SIG para el análisis espacial, generando conocimiento científico relevante y mejorando las prácticas mineras.

Según el Ministerio de Minas y Energía (2024), el sector minero juega un papel crucial en la economía y desarrollo del país, contribuyendo con materias primas, el aporte de regalías y la generación de empleo. Además, el potencial de reservas en Colombia, respaldado por análisis geológicos y mineros, demanda una gestión ágil y coordinada que garantice que los proyectos mineros de grande y pequeña escala cumplan con estándares técnicos, ambientales y sociales. La definición de reservas, esencial para la viabilidad y continuidad de una mina (Torres, 2015), requiere estimar el tonelaje y la ley del material a extraer, considerando factores modificantes como el tipo de minado, el procesamiento, aspectos ambientales, ubicación, infraestructura y

variables legales, económicas, sociales y gubernamentales (CIM, 2019), lo cual exige recursos tecnológicos que garanticen el cálculo y que se pueda ubicar espacialmente zonas de mayor ley o potencial económico.

Sin embargo, los métodos actuales de estimación de reservas suelen ser complejos y requieren de software especializados, lo que limita su acceso para proyectos mineros de pequeña escala. Lo anterior afecta la fiabilidad de los cálculos y dificulta la planificación, obligando a recurrir a consultoras externas, incrementando costos y reduciendo la frecuencia de actualización de datos. Este aspecto es crítico, ya que los informes de factibilidad exigidos a cualquier proyecto en producción deben reflejar fielmente la realidad del yacimiento para garantizar la vida productiva de la mina y soportar auditorías (Agencia de Regulación y Control Minero, 2016).

Los avances tecnológicos y la incorporación de herramientas como el software especializado en SIG han permitido manejar una mayor y diversa cantidad de datos (CIM, 2019), lo que motivó el desarrollo un procedimiento actualizado que integre estas tecnologías dentro de un marco de buenas prácticas mineras. Este procedimiento realizó cálculos de reservas menos complejos que los modelos de bloques y más precisos que los métodos tradicionales, al considerar variables espaciales del depósito y al automatizar la actualización de la información, además de favorecer el uso de software libre para proyectos mineros pequeños, cerrando la brecha entre las reservas estimadas y la producción real, e incrementando la certidumbre, confiabilidad, rentabilidad y atrayendo mayores inversiones.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar un procedimiento con el uso de métodos geoestadístico en un sistema de información geográfica (SIG) para mejorar la precisión y reducir la incertidumbre en el cálculo de reservas de vetas de oro en el sector de minería subterránea del nordeste del departamento de Antioquia.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión de literatura para comparar los diferentes métodos de estimación de reservas de oro existentes.
- Establecer una metodología geoestadística de cálculos de reservas en un sistema de información geográfica que incluya métodos de interpolación espacial.
- Integrar en el sistema de información geográfica (SIG) componentes del modelo geológico, como el espesor y la variación en la distribución espacial del oro en el cuerpo mineralizado.
- Automatizar la metodología geoestadística desarrollada en un SIG mediante modelos de geoprocesamiento con interfaz gráfica simple e intuitiva como Model Builder o Model Designer para facilitar su visualización, análisis y uso de parte de los usuarios.

4. Antecedentes

En las últimas décadas, el aumento en la demanda de recursos minerales ha llevado a un crecimiento acelerado de las operaciones mineras, esto se ha logrado por medio de la tecnificación de los diferentes procesos, uno de ellos el cálculo de reservas, con el cual se busca garantizar la viabilidad y la continuidad de los proyectos. En el presente estudio se pretende generar un procedimiento para cálculo de reservas aplicando métodos geoestadísticos, por medio del uso de herramientas SIG, brindando una alternativa a las metodologías modernas de cálculo de reservas por medio de modelos de bloques.

Dentro de los estudios previos, se han identificado tres fases principales en la evolución de las metodologías para el cálculo de reservas. La primera fase se caracteriza por el uso de cálculos manuales. En la segunda fase, se introduce la geoestadística, lo que mejora significativamente la precisión. La tercera fase está marcada por el acceso a herramientas tecnológicas, que facilitan la implementación de métodos geoestadísticos de manera más eficiente. Cabe destacar que, a pesar de la disponibilidad de métodos tecnológicos, los métodos manuales siguen siendo ampliamente utilizados debido a la complejidad de la aplicación de los métodos modernos y los elevados costos de los programas especializados.

A continuación, se presentan una serie de estudios aplicados al cálculo de reservas, con el objetivo de comparar entre los dos ramales metodológicos y mostrar el progreso a través de cada una de las etapas de su evolución. Estos estudios se enfocan principalmente en depósitos polimetálicos de geometrías tabulares y angostas, características presentes en los depósitos vetiformes del nordeste antioqueño, lugar donde se aplicará la investigación.

Quispe (2022) llevó a cabo la evaluación geológica para el cálculo de reservas en el proyecto Alpacay, ubicado en Arequipa, Perú. Este proyecto presenta características similares a la zona donde se llevará a cabo el estudio en curso, tanto en términos geológicos como en la información base disponible para los cálculos. Ambos se desarrollan en cuerpos vetiformes estrechos, con zonas de oreshoot dispuestas en direcciones preferenciales y alta erraticidad en los valores de oro (variaciones bruscas en los contenidos de oro en pocos metros). Además, al ubicarse en una zona con proyectos activos, se dispone de información tanto de muestreo de canal en interior mina como de perforaciones. El estudio de Quispe se basó en cálculos de reservas utilizando métodos convencionales. Como conclusión, se determinó que los resultados no son confiables, por lo que se recomienda, para futuros cálculos, implementar un análisis geoestadístico que considere las variables de manera regionalizada, permitiendo un mayor control sobre la alta variabilidad de las leyes en el depósito.

Vega (2013) en su trabajo de tesis de cálculo de reservas de la veta Paraíso señala que, mientras que los métodos clásicos utilizan valores medios o medias ponderadas para el cálculo de bloques, definidos de manera conveniente por quien realiza el cálculo, los métodos geoestadísticos en comparación consideran las características de variabilidad y correlación espacial de los datos, mejorando la precisión de los resultados.

En cuento a los datos, Vega utilizo muestreo de canal sistemático a interior mina, espaciado cada dos metros, señala que en las zonas en las cuales no se tiene muestreo o donde no fue posible la toma por temas de seguridad, el espacio no debe quedar vacío si no que se le asigna el promedio de los valores contiguos con el fin de no alterar la malla regular y evitar el sesgo de la información, en nuestro caso para el cálculo de reservas fue usada también

información de muestreo de canal sistemático, en futuros ejercicios en caso de presencia de zonas sin información se podría optar por asignación de valores con promedio de muestras circundantes.

Torabi y Choudhary (2017) presentaron un resumen de la aplicación de las diferentes metodologías, tanto convencionales como asistidas por computador. Se menciona que para la estimación de recursos y cálculo de reservas en vetas estrechas se ha usado principalmente el método poligonal, debido a la facilidad que este presenta para la asignación de leyes. También se describe de manera breve los pasos para la aplicación de métodos geoestadísticos y los diferentes métodos de interpolación.

En su estudio, Afeni, et al. (2021) compararon los resultados obtenidos mediante métodos geométricos y geoestadísticos para estimar las reservas de un depósito de piedra caliza. A pesar de tratarse de un depósito no metálico, los investigadores obtuvieron conclusiones importantes, a considerar en el presente estudio. Aunque el tonelaje estimado fue similar con ambos enfoques, las leyes presentaron diferencias significativas, pudiendo afectar la viabilidad del proyecto minero evaluado. Los investigadores destacaron que los métodos geoestadísticos son más precisos, no solo en el cálculo final de reservas, sino también en el modelamiento de las leyes, mostrando como estas se distribuyen en el depósito de manera más confiable. Esto, a su vez, permite una mejor planificación y diseño de la mina.

Williams (1985) nos muestra los comienzos del uso de la geoestadística para la estimación de recursos y reservas en minería. En su investigación se presentan una serie de cálculos manuales que evidencian lo complejo de esta labor en épocas pasadas. Aunque en este caso se trata de una mina de tungsteno alojado en vetas hidrotermales, y a pesar de ser un

mineral diferente al tratado en el presente estudio, de manera similar a lo ocurrido con vetas de oro, la ocurrencia del mineral es muy errática, siendo por esto común la estimación de reservas a partir de labores o desarrollo minero, no siendo suficiente contar con perforaciones. Otro artículo que ilustra los inicios del uso de geoestadística en cálculo de reservas en vetas es el escrito por Da Silva (1993), quien en su estudio de geoestadística aplicada a los depósitos de tipo veta, menciona que la estimación de reservas en este tipo de depósitos se compone básicamente de dos parámetros, el espesor de veta y el tenor, para los cuales realizo estimaciones tanto de manera separada como de manera conjunta a través del producto de ambos, en el artículo se discute como al estimar juntos los parámetros, el tenor es suavizado por el espesor, el cual tiende a tener valores más continuos, perdiéndose la visualización de tendencias o de cambios bruscos en las leyes.

Otro estudio que expone algunas de las metodologías tanto convencionales como geoestadísticas es el presentado por Dominy et al. (1999). Los autores señalan de manera detallada los factores a tener en cuenta al momento de realizar estimaciones y cálculo de reservas en proyectos de vetas angostas. Estos resaltan que este tipo de depósitos presenta características como erraticidad de las zonas de alto tenor, zonas con distribución pepitica en las cuales no se observa ningún tipo de correlación espacial de los datos, complejidad geológica, entre otras, complicando en gran medida los análisis geoestadísticos y finalmente la estimación. Como conclusión importante de este artículo se aclara que debido a la complejidad antes mencionada no es correcto definir recursos medidos y reservas únicamente con datos de perforación, para esto será necesario contar con desarrollo minero.

A pesar de tratarse de una investigación realizada en un momento en el cual no se contaba con los potentes equipos de cómputo actuales, los cuales han facilitado el modelamiento

geológico y el procesamiento de la estimación, es importante resaltar que los autores mencionan que la mejor manera de estimar vetas estrechas es a partir de proyecciones en dos dimensiones, esta afirmación valida la intención de representar el resultado final de nuestra investigación en formato ráster. También se menciona que debido a la complejidad de estos depósitos en muchas ocasiones después de realizado el minado, se obtendrá un numero de onzas muy diferente al proyectado, en estos casos recomiendan realizar una reconciliación, buscando corregir y ajustar en mejor medida las siguientes estimaciones, siendo este un factor a considerar en la etapa de prueba y validación de la metodología que se aplicará.

A continuación, se presentan algunos trabajos de aplicación de métodos geoestadísticos para el cálculo de reservas mineras.

Human y Nina (2016) realizaron un análisis geoestadístico para el cálculo de reservas en Veta Esperanza, en la mina Recuperada de la compañía Minas Buenaventura, ubicada en Huancavelica, Perú. En este estudio se plantea como alternativa del cálculo de reservas por métodos convencionales la estimación mediante métodos geoestadísticos, con el objetivo de realizar un planeamiento minero más eficiente; por medio de la geoestadística Human y Nina logran obtener resultados más fiables y con mayor rapidez, mejorando el proceso de cálculo de reservas para la compañía.

Báez (2018) realizo la estimación a partir de métodos geoestadísticos de la veta Bertha ubicada en el flanco Occidental de la Cordillera de los Andes Peruanos, como conclusión de su trabajo señala que la aplicación de métodos geoestadísticos para el cálculo o estimación de reservas y recursos solucionan tres factores primordiales, necesarios para obtener recursos y reservas minerales confiables. En primer lugar, permite la detección de valores erráticos

(capping) reduciendo el sesgo introducido por los valores extremos en los cálculos de recursos y reservas, también cuantifica el grado de anisotropía de las variables mediante la elaboración de variogramas, permitiendo incluir en los cálculos las tendencias o direcciones preferenciales de la distribución espacial de las variables en estudio, finalmente señala que permite realizar la estimación de manera óptima a través de métodos de interpolación como el Kriging ordinario, considerando aspectos tanto geométricos como geológicos.

Los siguientes autores señalan factores clave a tener en cuenta al memento de realizar las estimaciones o cálculo de reservas.

Ludeña (2021) implemento métodos geoestadísticos para el cálculo de reservas de un depósito tipo pórfido ubicado en el distrito de Cashapampa, Perú. Aunque se trate de un depósito diferente al del presente estudio, Ludeña señala un factor clave para tener en cuenta; en el proceso de cálculo de reserva a partir de modelos de bloques debe considerarse que la longitud de los compósitos y la definición de la dimensión de los bloques debe ser acorde con la unidad de minado para que la planeación y el diseño de minado sea optimo, en el caso de este depósito tipo pórfido, la unidad de minado definida fue de 10m, considerando el diseño del pit. En este caso al tratarse de cuerpos tabulares con variaciones en el espesor de centimétricos a métricos, no es posible regularizar el tamaño de bloque y estos deberán variar de acuerdo a las características locales del cuerpo, generándose la necesidad de procesos adicionales y volúmenes más grandes de información, complicando el proceso de estimación de recursos y cálculo de reservas y la planeación minera, siendo necesario buscar alternativas para los trabajos a corto plazo.

En el estudio realizado por Pysmennyi, et al. (2022) fueron determinadas las reservas de un depósito tabular de ilmenita por el método de modelo de boques, en la etapa de análisis geoestadístico los autores identificaron una distribución log normal-bimodal de los datos, esto

fue interpretado como la presencia de dos etapas de mineralización diferentes, siendo cada uno de los picos correspondiente a cada etapa. Este comportamiento es habitual en los depósitos de oro en vetas, en los cuales se presenta normalmente múltiples etapas de mineralización, cada una con características mineralógicas y de leyes específicas.

Castañón, et al. (2020) en su estudio de desarrollo de nueva metodología para cálculo de recursos y reservas minerales para cuerpos minerales de forma tabular, mencionan como la utilización de modelos de bloques en yacimientos tabulares no es conveniente, dado que no se obtiene una representación fiel de la geometría de la estructura, además de que el cálculo se hace a partir de compositos y no directamente sobre el intercepto pozo – estructura. Como solución implementan el método pentaédrico, obteniendo un modelo 3D mejor ajustado y por ende una mejor estimación. Si bien, el método pentaédrico no será el aplicado en este proyecto, la importancia de este articulo radica en que señala los problemas de aplicar el método de modelos de bloques, dejando en claro la necesidad de buscar alternativas para representar y calcular las reservas en los depósitos con este tipo de geometrías. Estos mismos autores junto con Ruiz en su artículo presentado en el 2017, señalan también que la metodología pentaédrica permite tener en cuenta parámetros mineros relacionados al espesor de veta, como la altura mínima de minado o la sobre dilución generada por la sobre excavación. En nuestro caso estos parámetros, cruciales para definir la viabilidad del proyecto, fueron incluidos por medio de algebra de mapas.

Torres, et al. (2020) realizaron el cálculo de reservas para un proyecto de minería subterránea por medio del método O'Hara. La importancia de este articulo para la actual investigación radica en que hace énfasis en la importancia de tres factores claves al momento de realizar el cálculo de reservas mineras: la dilución, el precio de venta y los costos de operación.

Los factores mencionados no entraran directamente en el cálculo de reservas del presente estudio como lo hacen en el método O'Hara, pero se encontrarán implícitos en el valor del Cutoff determinado para el proyecto piloto. Es de resaltar que estos parámetros varían en el tiempo y que de ellos dependerá también que las reservas mineras determinadas en este momento sean o no minables en un futuro en el cual se tengan precios de venta o costos operativos diferentes a los definidos al momento del cálculo. En cuanto al factor de dilución, este depende entre otras cosas del método de explotación, por lo que también podría variar de acuerdo con el desarrollo de nuevos métodos que permitan reducir esta dilución y mejorar la efectividad de la explotación.

Shenavar, et al. (2021) también consideraron en su estudio la incertidumbre presente en el tenor y el precio de venta, proponiendo como solución una metodología que considera diferentes escenarios tanto optimistas como pesimistas, mostrando como estos factores afectan de manera directa la cantidad de reservas explotables.

Por su parte Strukov, et al. (2018) compararon métodos de minado masivos y selectivos para un proyecto de oro en vetas, estos mostraron como los cambios en el método de minado influyen en la viabilidad de explotación de zonas que en un inicio fueron dejadas por considerarse de baja calidad, con el aumento en el precio del oro y las variaciones en los métodos de explotación se pudo comprobar que zonas marginales pueden ser explotadas en un futuro con condiciones óptimas, permitiendo generar reservas a partir de bloques previamente abandonados.

Carvalho (2018) realizo un ejercicio de modelamiento de depósitos tipo veta, teniendo en cuenta la incertidumbre de la posición y el espesor, característica de este tipo de estructuras. Carvalho señala que no se tiene una certeza del comportamiento en las áreas entre los intersectos de los pozos, por lo que es necesario realizar varias corridas de modelamiento, con el fin de obtener diferentes geometrías posibles. Lo señalado por este autor es importante, ya que, de no

realizarse diferentes corridas para generar diferentes geometrías, esta incertidumbre deberá ser tenida en cuenta de otro modo al momento de realizar el reporte final de reservas.

5. Referente normativo y legal

De acuerdo con la autoridad reguladora de valores internacional (OICV), las compañías dedicadas a actividades extractivas, que cotizan en bolsa de valores, deben compartir información técnica precisa de acuerdo con estándares de calidad, definidos por el Comité para Estándares de Informes Internacionales de Reservas Minerales (CRIRSCO), esto con el fin de garantizar la transparencia y veracidad de los datos reportados. Dentro de los informes avalados por el CRIRSCO, se encuentran los informes de recursos técnicos en términos de códigos nacionales, como el JORC de Australia, el NI 43-101 de Canadá o el PERC de Europa, entre otros, el uso de uno u otro dependerá de la bolsa de valores en la cual cotice la compañía. (SRK Consulting, 2024)

Si bien, el procedimiento de cálculo de reservas fue pensado como una herramienta práctica, de uso operativo, se debe procurar cumplir con estándares de calidad de acuerdo con normativa internacional.

En cuento a normativa local, Colombia cuenta con un Estándar para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales, definido por la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR).

Además, como ente regulador, la Agencia Nacional de Minería bajo la resolución N°100, establece las condiciones y periodicidad para la presentación de la información sobre los recursos y reservas minerales existentes en las áreas en concesión, de acuerdo con el artículo 328 de la ley 195 de 2019. (Servicio geológico colombiano, 2020)

Dicha normativa local juega un papel importante en caso de aplicar la metodología en proyectos de pequeña minería, en los cuales no se cuente con estimaciones elaboradas por

métodos robustos. Siendo esta información de la calidad necesaria para ser presentada ante requerimientos de entidades estatales.

Considerando que en la última etapa del proyecto se espera realizar un piloto de aplicación en alguna compañía del sector, se deberán tener en cuenta las Políticas internas de esta compañía, respecto a confidencialidad de la información.

6. Referente teórico

Se entiende como un depósito o yacimiento mineral, a aquellas partes de la corteza terrestre en las cuales, debido a diferentes procesos geológicos, se genera una acumulación de materia prima mineral que por sus características y condiciones se considera rentable para su explotación (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2017). Esta formación es fundamental para la minería.

Un recurso mineral es el total existente de mineral incluyendo lo que no podrá ser explotado debido a su baja concentración o ley ya que esto influye en los factores económicos y de viabilidad (SGM, 2017). Estos recursos minerales pueden clasificarse en Indicados, medidos e inferidos (JORC, 2012). La Comisión Colombiana de Recursos y Reservas [CCRR] (2018) define una Reserva Mineral como la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral ya sea medido o indicado, definido previamente mediante estudios de pre-factibilidad o de factibilidad los cuales deben incluir los factores modificadores que puedan estar presentes; así mismo, el cálculo de reservas da como resultado un tonelaje y tenor estimados. Según los lineamientos del código JORC (2012), se requieren evaluaciones exhaustivas de todos los factores modificadores para determinar la cantidad de recursos minerales medidos e indicados que se pueden convertir en reservas minerales.

Las reservas minerales se subdividen en orden de confiabilidad creciente en reservas minerales probables y reservas minerales probadas (Combined Reserves International Reporting Standars Commitee [CRIRSCO], 2003). Las reservas probadas son aquellas que se pueden extraer con un alto grado de certeza ya que se han llevado a cabo todas las evaluaciones

apropiadas, estudios de viabilidad y los reportes demuestran que la extracción está razonablemente justificada (CRIRSCO, 2003) , mientras que las reservas probables tienen un grado de certeza menor, pero aún se consideran viables económicamente; las variables involucradas se conocen como los factores modificadores, que pueden ser mineros, metalúrgicos, económicos, de infraestructura, de mercado, sociales, legales, ambientales o gubernamentales (Agencia Nacional de Minería [ANM], 2017), (CCRR, 2018), (CRIRSCO, 2003) . Es un requerimiento que un estudio completo de pre- factibilidad considere los factores modificadores más relevantes ya que son determinantes en la viabilidad de un proyecto minero (JORC, 2012).

El cálculo o estimación de las reservas minerales es un proceso crítico en la industria minera, ya que determina la viabilidad económica de un proyecto y su potencial de desarrollo y esto sería imposible sin un cálculo preciso. El propósito de la estimación de reservas de un depósito o yacimiento mineral es identificar la cantidad de mineral existente y así poder determinar la factibilidad de la explotación económica de estos minerales; este proceso debe ser realizado a lo largo de toda la vida útil de la mina en todas sus etapas, desde la prospección preliminar hasta el final de la actividad comercial o hasta que se agoten las reservas del depósito (Meza, 2017). Estos cálculos son valiosos ya que permiten aumentar la productividad y eficiencia en términos del desarrollo y planeación de un proyecto.

Así mismo, es igual de importante conocer el yacimiento en su totalidad por medio de las exploraciones y desarrollos de modelos geológicos que permitan identificar la distribución de los valores del mineral de interés dentro del depósito; es importante ya que a partir de esto se debe determinar el tipo de procesos metalúrgicos que se van a aplicar, los tamaños y tipos adecuados de equipos que se van a disponer en la mina, la producción diaria y anual, los métodos de minado, y los recursos humanos y materiales entre otros (López, 2003).

Existen varios métodos tradicionales para realizar estos cálculos los cuales consisten en la construcción de bloques, triángulos, polígonos o áreas a las cuales se les asignan variables que dependen de la media aritmética o ponderada y permite realizar interpolaciones entre estas variables; los bloques o sectores deben ser interpretados de manera individual para luego ser integrados y evaluados y así determinar las reservas totales del depósito o yacimiento (Poppoff, 1966). Estos métodos clásicos por lo general se realizan de manera manual y por lo tanto no son adecuados en caso de que el depósito a evaluar presente alta variabilidad en términos geológicos o estructurales (ANM, 2021).

Poppoff (1966) define cuatro métodos convencionales para la evaluación de reservas minerales los cuales serán sintetizados a continuación:

- El método de factores y áreas de influencia consiste en delimitar las áreas involucradas teniendo en cuenta aspectos geológicos, mineros y económicos. Se realizan cálculos estimativos de las dimensiones del depósito, la ley del mineral existente y factores de influencia. También se realizan cálculos tomando como base depósitos similares u otras porciones del mismo depósito.
- El método de los bloques minables se realiza durante la etapa de extracción de la mina ya que requiere la delimitación de las áreas del depósito en bloques que se realizan en los trabajos subterráneos. Se realiza el cálculo analítico de los factores para cada bloque.
- El método de las secciones transversales requiere delimitar el cuerpo mineralizado y se procede a organizar bloques teniendo en cuenta la interpretación de la geología.

- Para aplicar los métodos analíticos o geométricos se necesita hacer una división de manera grafica del depósito en forma de geometrías simples como triángulos o polígonos. Se determinan los factores para cada polígono y se realiza un cálculo aritmético promedio.

Poppoff (1966) también define dos métodos computarizados que se utilizan en la modernidad como los son los métodos estadísticos y los geoestadísticos:

- Los métodos estadísticos, al igual que los métodos convencionales, también necesitan de una base de datos sólida obtenida de los resultados de campo, los cuales deben ser debidamente registrados y organizados como lo son la delimitación de cuerpos, morfologías, muestreo y mineralogía. Con esta información se procede a la elaboración de gráficas estadísticas donde se registra la ocurrencia de las frecuencias relativas.
- Los métodos geoestadísticos consisten en cálculos más avanzados y profesionales capacitados. Son cálculos que se elaboran con una gran cantidad de información y se procesa en corto tiempo. Igualmente, es debido tener una base de datos solida que proporcione todo lo requerido. Estos métodos toman la magnitud de algunas variables como la ley con la posición en el espacio.

Para unificar la manera de presentar esta información, existen algunos códigos internacionales los cuales contienen los lineamientos bajo los cuales se deben hacer los reportes oficiales de los cálculos de reservas y cómo se deben desarrollar los debidos reportes para éstos; puede existir una leve variación en el nivel de detalle entre los diferentes códigos internacionales, sin embargo, existen directrices que establecen los alcances y detalles que se

deben incluir y aplicar en los estudios de factibilidad que demuestran viabilidad económica cuando se realiza la conversión de recursos en reservas minerales (CRIRSCO, 2003).

Según López (2003), la confiabilidad de los cálculos de reservas depende en gran medida del conocimiento que se tenga del depósito y de la exactitud de los cálculos realizados; las variables como los límites del cuerpo mineral, los promedios ponderados y las fórmulas aplicadas también son importantes factores a tener en cuenta. En la modernidad, la geología económica cuenta con herramientas eficientes para realizar cálculos con exactitud, así como también se cuenta con determinados lineamientos para extraer información en campo, lo cual influye también en la confiabilidad de los resultados obtenidos ya sea en muestreo, en minado, en análisis estadísticos o de modelamiento (López, 2003).

En la exploración geológica, los datos son la base fundamental del cálculo de reservas, a partir de los datos es posible hacer los cálculos de reservas y la posterior caracterización del depósito mineral en términos de su geometría, continuidad y distribución del contenido del oro. El volumen de datos obtenidos en un muestreo geológico es también crucial ya que determina la precisión de la estimación realizada; se requiere una densidad de muestreo suficiente para captar la posible variabilidad presente en el depósito y los diferentes espesores que se puedan presentar en la veta.

En cuanto a la interpretación de la geología, que es indispensable para la comprensión de la naturaleza de los datos usados, se debe tener presente que el uso de la información geológica debe guiar y controlar los cálculos que se van a realizar, considerando la extensión y dimensión de la mineralización en el depósito, ya que estos presentan variabilidad en las concentraciones,

en la longitud y profundidad bajo la superficie; estos factores afectan tanto la ley como la continuidad geológica (JORC, 2012).

El modelamiento de vetas de oro es esencial en la exploración y explotación minera, ya que permite transformar datos obtenidos en puntos específicos en modelos continuos que muestran cómo varía el recurso a lo largo del área de estudio. Para lograrlo, se emplean diversos métodos de interpolación, siendo los más comunes el kriging y la ponderación inversa de la distancia (IDW) (Journel & Huijbregts, 1978; Chiles & Delfiner, 1999; Burrough, 1990).

El kriging es una técnica geostatística que se apoya en la idea de que los valores de puntos cercanos tienden a ser más similares entre sí que aquellos que están alejados. Para comenzar, se calcula un semivariograma, que es una herramienta que mide cómo varían las diferencias entre puntos en función de la distancia. Este semivariograma se ajusta luego a un modelo teórico (como el esférico, exponencial o gaussiano) para identificar parámetros clave: el alcance (la distancia a la que los valores dejan de estar relacionados), el efecto pepita (la variabilidad a escalas muy pequeñas) y la meseta (la variabilidad máxima).

Con este modelo definido, se procede a estimar el valor en un punto sin datos directos mediante una combinación lineal de los valores de puntos cercanos. Cada uno de estos puntos recibe un peso calculado a partir de un sistema de ecuaciones que minimiza la incertidumbre de la estimación, asegurando además que la suma de todos los pesos sea igual a 1. Este proceso no solo proporciona la estimación puntual, sino que también permite conocer el margen de error asociado a la predicción (Journel & Huijbregts, 1978; Chiles & Delfiner, 1999).

Por otro lado, la ponderación inversa de la distancia (IDW) es un método más sencillo que asigna mayor importancia a los datos ubicados cerca del punto de interés, basándose en la

premisa de que la influencia de cada dato disminuye al aumentar la distancia. Aunque IDW no incorpora de manera explícita la correlación espacial como lo hace el kriging, su sencillez y rapidez lo hacen muy útil en situaciones donde se cuenta con pocos datos (Burrough, 1990).

7. Metodología

Para la construcción del procedimiento para aplicación de métodos geoestadísticos en el cálculo de reservas en depósitos de oro en vetas con el uso de software SIG, aplicado en el distrito minero Segovia – Remedios, en primer lugar, se realizó un análisis de las metodologías existentes, para identificar las características que debían incorporarse en el nuevo procedimiento. A continuación, fueron seleccionados los software SIG más adecuados, evaluando factores como el costo, la disponibilidad de herramientas, la posibilidad de automatización, entre otros.

De acuerdo con las observaciones realizadas en la etapa de investigación, fue construido el procedimiento, buscando concretar una serie de pasos para llegar al resultado final de acuerdo con las herramientas disponibles en los software seleccionados, una vez definido, fue ejecutada la prueba piloto a partir de los datos suministrados por la compañía seleccionada.

Para la etapa de prueba se partió por la revisión de la base de datos, con el fin de garantizar la calidad de estos previo a cualquier tipo de procesamiento.

Para la aplicación del procedimiento se requirió en un comienzo el análisis geoestadístico de los datos, con el propósito de definir los parámetros de estimación de reservas, posteriormente se ejecutó el proceso definido en cada uno de los software, se resalta que parte fundamental del proceso constó de la evaluación de diferentes métodos de interpolación, buscando el de mejor ajuste.

En la última etapa se construyó el modelo de geoprocesamiento, obteniéndose así el procedimiento automatizado final para el cálculo de reservas.

7.1 Enfoque metodológico

El proyecto de investigación se ejecutó a partir de métodos mixtos, con análisis de tipo exploratorio secuencial. Inicialmente se contó con una etapa cualitativa, en la que se analizaron las metodologías existentes para el cálculo de reservas en proyectos de minería subterránea de oro en vetas, con el fin de identificar las características (positivas y negativas) a considerar para el desarrollo del procedimiento. Asimismo, se realizó un análisis para seleccionar los software más adecuados para el desarrollo del proyecto, buscando opciones que se ajusten de manera óptima según los requerimientos específicos.

Posteriormente, se llevó a cabo la fase cuantitativa, en esta etapa se desarrolló la metodología de cálculo de reservas con técnicas de geoestadística e interpolación. En la etapa de prueba e implementación, se ajustó la metodología desarrollada a las características específicas del lugar escogido, definidas mediante análisis exploratorio de datos de la zona de interés, a partir de bases de datos de muestreo histórico, permitiendo definir los parámetros de interpolación adecuados para el caso. Esta etapa incluyó además un proceso de validación, en el que se seleccionó mediante análisis estadísticos cuál de las técnicas evaluadas generaba los resultados más ajustados a la realidad.

7.2 Tipo de estudio

Debido a que el objetivo es desarrollar una nueva metodología para el cálculo de reservas, se implementó tipos de estudios explicativos y descriptivos. El enfoque principal fue el estudio explicativo, ya que permite entender por qué se presentan deficiencias en los métodos actuales y cómo la propuesta de este proyecto puede superarlas. Se buscó responder a las

preguntas de por qué el nuevo método basado en herramientas SIG y geoestadística, es más preciso y eficiente en estimación de reservas y también cómo funciona.

Sin embargo, se complementó con el estudio descriptivo. Este tipo de estudio permitió caracterizar los métodos existentes, donde se identificó sus fortalezas y, sobre todo, sus limitaciones. Al establecer un marco de referencia sólido, se construyó la nueva metodología que supera esas limitaciones. Es decir, la descripción detallada permitió un punto de comparación entre los métodos tradicionales y la nueva metodología para la evaluación del impacto existente en términos de precisión y eficiencia.

Finalmente, la combinación de ambos tipos de estudios posibilitó una comprensión integral del problema, facilitando la implementación de la metodología y la correcta validación de su impacto a través de la comparación con los enfoques tradicionales, y así, introducir mejoras en términos de planificación y explotación minera.

7.3 Procedimiento

A continuación, se realiza una breve descripción de las etapas del proyecto, haciendo énfasis en las técnicas de análisis que se implementaron.

- Análisis de metodologías existentes: Búsqueda de información de metodologías para el cálculo de reservas (consulta de tesis en repositorios académicos, revistas científicas, libros), esta etapa contempló la construcción del estado del arte y los

antecedentes, identificando a partir de estos las características para tener en cuenta en el desarrollo del método.

- Elección del software: Para seleccionar el software SIG más adecuado, se aplicó una matriz de ponderación por puntos basada en criterios como costo, facilidad de uso, funcionalidades avanzadas, comunidad de usuarios y soporte técnico. Se evaluaron ArcGIS, QGIS, MapInfo, GRASS GIS y GeoDa, considerando tanto opciones de software libre como licenciado. Posteriormente, se realizó una exploración directa de las funcionalidades de cada software, priorizando aquellos con herramientas avanzadas, documentación extensa y capacidades de automatización.
- Desarrollo del procedimiento:
    a. Desarrollo del procedimiento en el software SIG: En este paso se definió el flujo de trabajo en los software SIG para el cálculo de reservas. Esto consistió en la exploración y definición de las diferentes herramientas de los software y la construcción del paso a paso que llevó a la obtención del resultado final.
- Prueba piloto.
    a. Obtención de información: Inicialmente se seleccionó la población, la investigación se enfocó en los depósitos de oro en vetas del nordeste de Antioquia, una región con intensa actividad minera. Para realizar un análisis efectivo, se seleccionó una muestra basada en datos históricos de muestreo de canal proporcionados por una empresa minera de la región. Se priorizó áreas ya explotadas, asegurando así la disponibilidad de información útil y

respetando las políticas de confidencialidad de la empresa, evitando divulgar la ubicación exacta de los datos.

En la mina seleccionada se realiza desde hace varias décadas el minado de una veta de cuarzo angosta embebida en granodiorita, de espesor variable entre 0,1 y 1,0 metros, con rumbo NW y buzamiento aproximado de 35 grados en dirección NE, como minerales mena se encuentran principalmente la pirita, seguida de galena y esfalerita, estando estas estrechamente ligadas a la concentración de oro y plata.

Es esencial que las muestras reflejen la variabilidad del contenido de oro en la zona, por lo que se buscaron áreas con notable heterogeneidad, una característica común en estos depósitos. El muestreo se realiza cada 2 metros en las labores subterráneas, lo que permite capturar las variaciones significativas en el contenido de oro a lo largo de la veta, proporcionando una representación precisa de las condiciones reales del terreno.

A continuación, se presenta un ejemplo de la estructura de la base de datos con algunos registros.

Tabla 1 Estructura de la base de datos

ID CANAL	COORDENADA E	COORDENADA N	COORDENADA Z	COD. MUESTRA	ANCHO DE MUESTRA (m)	DESDE (m)	HASTA (m)	TIPO DE MATERIAL	AU (g/ton)	AG (g/ton)
C-5687	7465350	12465350	220	C-5687	0.2	0	0.2	Respaldo	0.2	
C-5687	7465350	12465350	220	C-5688	0.3	0.2	0.5	Veta	5.4	
C-5687	7465350	12465350	220	C-5689	0.2	0.5	0.7	Veta	8.3	
C-5690	7465355	12465346	218	C-5690	0.5	0	0.5	Veta	9.4	25
C-5691	7465370	12465330	224	C-5691	0.4	0	0.4	Veta	2.1	
C-5692	7465380	12465324	215	C-5692	0.15	0	0.15	Respaldo	1.2	
C-5692	7465380	12465324	215	C-5693	0.3	0.15	0.45	Veta	6.4	
C-5694	7465390	12465315	222	C-5694	0.5	0	0.5	Veta	1	10
C-5695	7465395	12465300	228	C-5695	0.4	0	0.4	Veta	0.5	

b. Análisis de la información: Como se mencionó anteriormente, dado que la información a usar pertenece a registros históricos y a que, se parte del supuesto que los análisis de oro y el almacenamiento de la información fueron

realizados siguiendo los estándares de calidad pertinentes, es importante resaltar que la mayoría de esta información fue digitalizada y ubicada de manera manual, por medio de software CAD y software no especializados para la manipulación, almacenamiento y administración de bases de datos, por lo que existieron diferentes errores. Para garantizar trabajar con información de calidad se realizó una serie de validaciones. En primer lugar, se hizo una depuración de la base de datos, en el cual se buscó errores como duplicidad de la información, errores en los rangos de muestreo, errores en la ubicación por problemas al momento de digitalizar las coordenadas, entre otros. El proceso se menciona en detalle seguidamente.

- Codificaciones erradas: Los códigos ID además de brindar de una identificación única a cada uno de los canales de muestreo brindan información adicional, normalmente estos cuentan con siglas que poseen significados particulares, por ejemplo, las siglas iniciales podrían referirse a la mina en específico de la cual corresponde el canal, o a la veta en la cual se hizo el muestreo. En este paso se buscó que las codificaciones sean coherentes, es decir que no se encuentren códigos que no correspondan al sector, la mina, o la veta en estudio, referenciados en las siglas.
- Duplicidad: Al momento de encontrar registros con el mismo ID (código de identificación), debido a que no se cuenta con la fuente inicial (registros físicos tomados al momento del muestreo) para verificar a cuál corresponde realmente el ID en cuestión, se procedió eliminar toda esta información.

- Overlaps y gaps: Estos problemas generados comúnmente al momento de la digitalización manual de la información, consistieron en la superposición y en la existencia de espacios vacíos dentro de un mismo canal. Es decir, cuando un canal se encuentra conformado por varias muestras, se aseguró que el final de la anterior sea exactamente igual al inicio de la siguiente. En caso de encontrarse problemas de este tipo se verifica con las medidas de ancho de muestra cada uno de los rangos, asegurando de que cumpla con la regla descrita.
- Validación de coordenadas: Se aseguró que los canales utilizados se estuvieran posicionados de manera correcta. Al cargar la información al software SIG, se revisó que estos se encontraran dentro del volumen que suscriben las labores mineras (dentro de la topografía).

c. Análisis exploratorio de datos: Se realizó el análisis geoestadístico, para la definición de las características de la mineralización en la mina especifica. Se tuvieron en cuenta varios parámetros estadísticos esenciales para el cálculo y la interpretación de la información:

– Promedio (Media): Se calculó el promedio del contenido de oro en las muestras, ofreciendo una estimación representativa de la concentración del metal en el área de estudio.
– Desviación Estándar: Este parámetro ayudó a entender la variabilidad o dispersión de los datos de concentración de oro, proporcionando una visión clara de la consistencia de los resultados obtenidos.

- Coeficiente de Variación: Calculado como el cociente entre la desviación estándar y la media, expresado como un porcentaje. Este índice es útil para evaluar la homogeneidad o heterogeneidad del contenido de oro en las muestras, facilitando la interpretación de los datos.
- Intervalos de Confianza: Se establecieron intervalos de confianza para las estimaciones de la media, permitiendo inferir con un cierto nivel de certeza la variabilidad en el contenido de oro de la población a partir de la muestra.
- Número de Vecinos: Este parámetro es clave en los métodos de interpolación, especificando cuántos puntos de datos se utilizaron para estimar el valor en cada ubicación.
- Peso de la Distancia: Se definió un valor de potencia (p) que dictó cómo se ponderan los puntos cercanos según su distancia, mejorando la precisión de las estimaciones.
- Variograma: Se construyó un variograma que describió la variabilidad de los datos en función de la distancia.

d. Interpolación espacial: Estimación de las variables (tenor, espesor, buzamiento) mediante datos de muestreo a través de diferentes métodos de interpolación, como IDW, Kriging, entre otros, y se analizaron los resultados estadísticamente buscando el mejor ajuste.

e. Cálculo de reservas: Determinación de las reservas con base en los resultados de las interpolaciones, tomando en cuenta factores como: volumen, tenor, espesor, buzamiento y cutoff.

f. Verificación y mejora: Evaluación de los resultados y ajuste de los modelos.

- Automatización del proceso:
    a. Herramientas de automatización: Se utilizaron las herramientas de automatización de los software SIG seleccionados, ModelBuilder de ArcGIS y Model Designer de QGIS.
    b. Métodos de análisis de la información: Se diseñó un modelo de geoprocesamiento automatizado que permite replicar el proceso de cálculo de reservas de manera eficiente y rápida.

8. Resultados

8.1 Análisis comparativo de metodologías para cálculo de reservas de oro

La revisión de la literatura se enfocó en la identificación de artículos, reportes técnicos y documentación normativa especializada en minería, geología económica y geoestadística. Además, se tuvo en cuenta los lineamientos de los códigos internacionales como lo son el código JORC y CRIRSCO.

En la selección de artículos fueron priorizados los que detallan los métodos de estimación de recursos y cálculo de reservas aplicados en depósitos de oro en vetas. La revisión permitió identificar enfoques de cálculo de reservas de dos tipos; los convencionales, como polígonos, secciones transversales y bloques minables (Poppoff, 1966), y los modernos, que son los estadísticos y geoestadísticos. A través de un análisis comparativo entre ambas clases, para determinar cuáles son las ventajas y desventajas principales de cada uno, se identificaron factores cruciales, como la precisión y la aplicabilidad en un contexto geológico en el que existen variaciones estructurales y variaciones en la mineralización de los depósitos. Los métodos convencionales, aunque son accesibles y más sencillos, no son efectivos en los depósitos con altas variaciones estructurales o mineralógicas, como lo indica Quispe (2020), lo que refuerza la importancia de la implementación de procesos geoestadísticos, ya que muestran mayor precisión y permiten la integración de la variación geológica (como lo indican López, 2003 y Vega, 2013).

Esto es congruente con respecto a lo encontrado en las revisiones de los códigos internacionales como CRIRSCO (2003) y JORC (2012), en los que se ha mencionado que los métodos estadísticos muestran mejor capacidad al integrar toda la información espacial del depósito junto con la variabilidad geológica. Por otro lado, los convencionales han mostrado cumplir el propósito, aunque con ciertas limitaciones en los depósitos que muestran alta heterogeneidad; esto se encuentra alineado con la observación realizada por López (2003) sobre la importancia de las herramientas precisas en la geología económica; y por Ludeña (2021) quien resalta la importancia de la adaptación de las condiciones locales en factores como la dilución, para un correcto cálculo de reservas.

En la revisión se identificaron practicas recomendadas para seleccionar el procedimiento según el tipo de yacimiento. Para los depósitos de oro en vetas, la literatura y los lineamientos consultados coinciden en la preferencia de la interpolación geoestadística, con bases de datos estructuradas y validaciones a lo largo de la vida útil de la mina (Afeni et al, 2021; Human y Nina, 2016).

Así mismo, en los códigos se hace énfasis en la consideración de todos los factores modificadores (ambientales, económicos, mineros y legales) en el cálculo de las reservas, ya que son claves en la precisión de los datos y en la viabilidad del proyecto, por lo que, por medio de la revisión bibliográfica, se pudo corroborar que los métodos modernos (geoestadísticos) tienden a facilitar la integración de todos los factores mientras que los convencionales requieren varios ajustes adicionales.

8.2 Elección de software

La *Tabla 2* presenta los resultados de la evaluación realizada para la elección del software idóneo para la implementación del proyecto.

Tabla 2 Matriz de ponderación de software SIG

Criterios	Peso (%)	ArcGIS	QGIS	MapInfo	GRASS GIS	GeoDa
Costo	20	2	5	3	5	5
Facilidad de uso	20	5	4	4	3	3
Funcionalidades avanzadas	30	5	4	3	4	3
Comunidad de usuarios	15	5	5	3	4	3
Soporte técnico	15	5	3	4	3	3
Puntaje total	100	**4.45**	**4.15**	3.45	4.05	3.6

El análisis mediante la matriz de ponderación por puntos facilitó la identificación de las características que se detallan a continuación.

Programas como QGIS, GRASS GIS y GeoDa son gratuitos, siendo más accesibles, a diferencia de ArcGIS y MapInfo, que requieren licencias. En cuanto a facilidad de uso, ArcGIS debido a su interfaz amigable es el más intuitivo, seguido por QGIS. En términos de funciones avanzadas como los análisis geoestadísticos, ArcGIS se destaca por sus herramientas robustas, aunque QGIS y GRASS GIS ofrecen alternativas completas. Cuando se trata de comunidad de usuarios ArcGIS y QGIS cuentan con grandes comunidades activas y con variedad de recursos. Finalmente, ArcGIS sobresale por su soporte técnico profesional, en contraste con los demás programas que dependen principalmente de sus comunidades de usuarios.

Con base en la evaluación, ArcGIS y QGIS resultaron ser las mejores opciones para el análisis propuesto, estos software son ampliamente utilizados a nivel global y ofrecen ventajas significativas, como una amplia documentación, herramientas avanzadas, y actualizaciones regulares. Además, ambos disponen de herramientas de automatización, siendo esto clave para el proyecto. El uso de ambos software para el proyecto, nos permitió evaluar tanto las opciones de software libre (QGIS) como las de software licenciado (ArcGIS).

8.3 Desarrollo del procedimiento para el cálculo de reservas mediante interpolación geoestadística

El procedimiento construido consta de tres etapas principales, la etapa inicial consiste en la recopilación y organización de la información. Para la elaboración de la metodología se partió de una base de datos histórica de muestreo en labores subterráneas, la cual fue filtrada y corregida de acuerdo con la metodología descrita en el capítulo anterior, garantizando la calidad y la representatividad de los datos.

La base de datos está constituida por un total de 8.025 canales de muestreo, espaciados cada 2 metros, configurando una base de datos robusta, ideal para el análisis realizado. En la *figura 1* se observa la distribución espacial de los canales en las labores mineras. Como estadísticas base se obtuvieron promedios de tenor de oro de 24,7g/t y de espesor de 0,36m, con desviaciones estándar de 56,1g/t y 0,22m respectivamente. Este primer vistazo a la base de datos evidenció características muy importantes como lo es el alto valor de desviación estándar para el tenor, que muestra la alta variabilidad de las concentraciones de oro en este tipo de depósitos; en

comparación con la desviación estándar del espesor que indica alta homogeneidad en el comportamiento de esta variable a lo largo de la mina, indicando una gran continuidad espacial de veta.

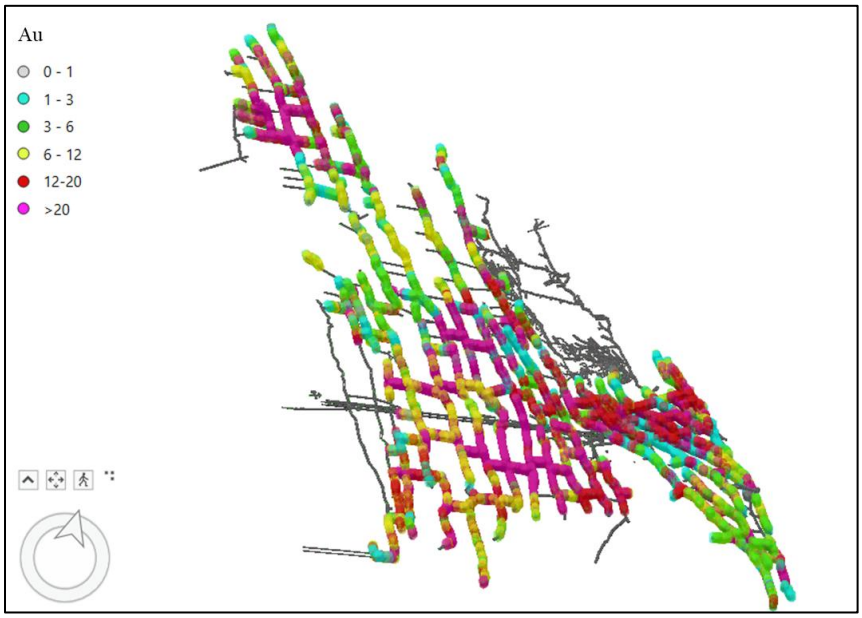


Figura 1 *Distribución espacial de los canales de muestreo que conforman la base de datos, con sus valores de oro correspondientes.*

La siguiente etapa, denominada etapa de interpolaciones, consistió en la generación de archivos ráster por medio de interpolaciones geoestadísticas realizadas a partir de la información geoespacial incluida en la base de datos de muestreo (coordenada Z o altura, valores de contenido de oro, características de la estructura como espesor y buzamiento). Los principales métodos de interpolación usados fueron el IDW, Kriging y machine learning, eligiéndose para cada caso particular el de mejor ajuste, de acuerdo con las herramientas disponibles en cada uno de los software usados.

- Interpolación del tenor:

En el caso del software ArcGIS Pro se cuenta con la herramienta ‘Interpolación Exploratoria’, esta fue seleccionada ya que permitió comparar entre diferentes métodos de interpolación (Kriging simple, Kriging simple - Tendencia y transformación, Kriging ordinario, Kriging universal, Kriging bayesiano, Interpolación de kernel, Ponderación de distancia inversa y Funciones de base radial). La herramienta generó y analizó los datos geoestadísticos, seleccionando de manera automatizada la interpolación que mejor se ajustó de acuerdo con sus estadísticas descriptivas y con la validación cruzada que realizó la herramienta dentro del proceso, que para este caso fue Empirical Bayesian Kriging (*Figura 2*).

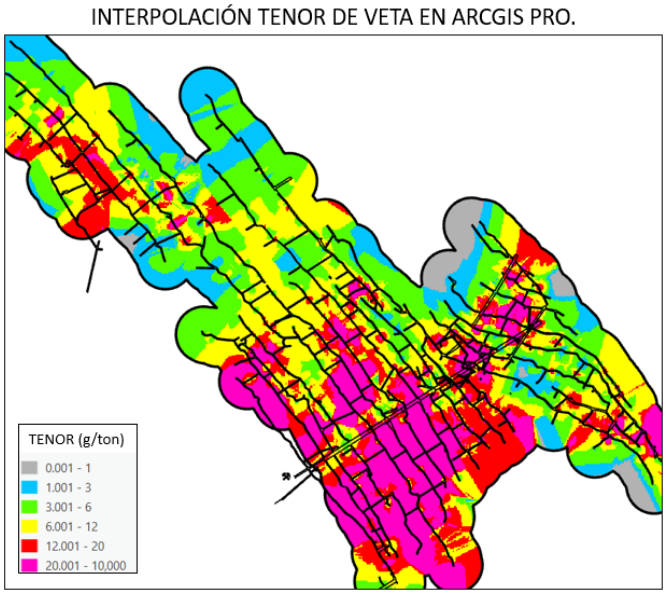


Figura 2 *Interpolación Empirical Bayesian Kriging - Advanced en ArcGIS para el tenor de la veta.*

Al realizar la validación visual comprobó que la distribución del contenido de oro generada en la interpolación fue coherente con los muestreos de canal base. Además, a partir de esta interpolación fue posible identificar la tendencia de oreshoot de manera visual, en la

dirección N38E, como se observa en la *figura 3*, dato que pudo ser corroborado con la dirección de menor varianza indicada en las estadísticas por el software.

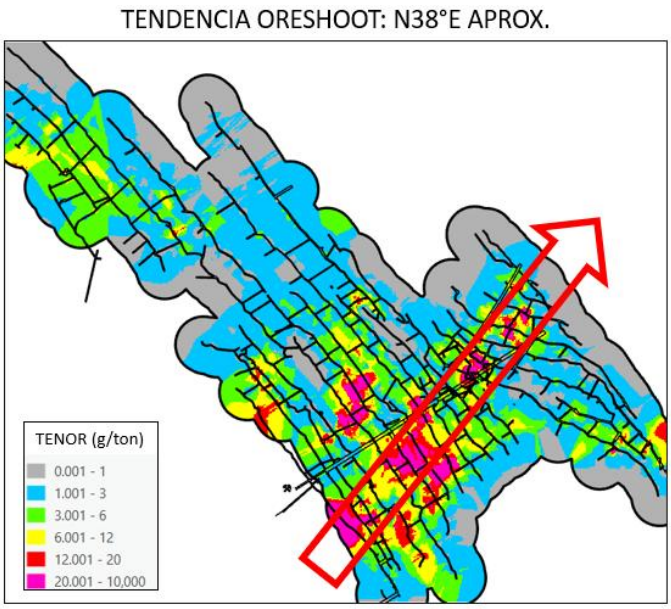


Figura 3*Tendencia del oreshoot en el ráster de tenor diluido.*

En el software QGIS se trabajó con el plugin SmartMap, que empleó métodos de kriging y técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning), y con el plugin GDAL para interpolaciones de tipo IDW. Para este caso, los métodos de Machine Learning mostraron resultados superiores (*Figura 4*), teniendo como única desventaja la presencia de restricciones en cuanto a la cantidad de muestras a interpolar, por lo que las corridas de cálculo de reservas se deberán hacer de manera sectorizada para áreas con más de 5000 muestras, en caso de que se decida usar esta herramienta.

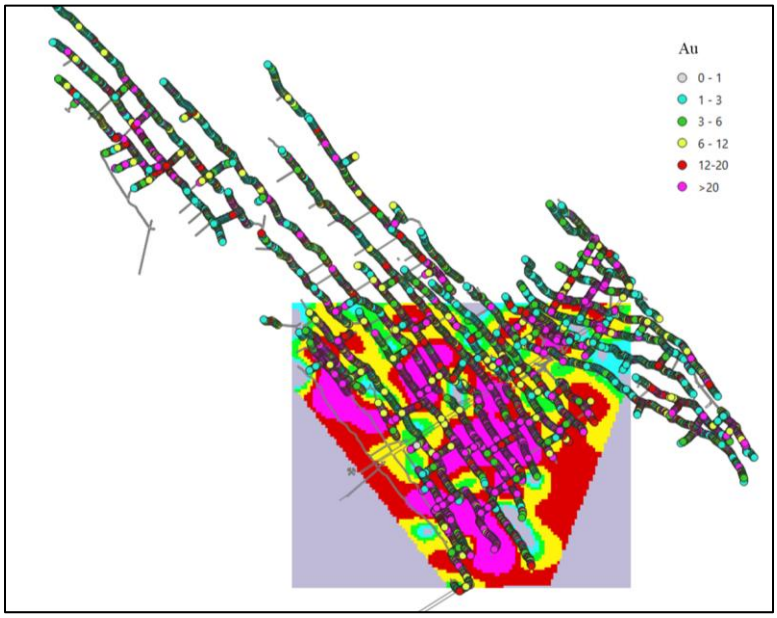


Figura 4 *Interpolación con Machine Learning en QGIS para el tenor, en la imagen se observa la restricción de la herramienta en cuanto a la cantidad de muestras, se redujo el área de trabajo.*

- Interpolación de las variables espesor de veta y coordenada Z (altura):

Estas dos variables que definen la geometría de la estructura y son base para el cálculo de volúmenes y parámetros de minado, fueron también interpoladas por medio de las herramientas especificadas en el apartado anterior. Debido al comportamiento homogéneo del espesor de veta a lo largo de la mina, que no presenta variaciones erráticas como las observadas en los valores de oro, se obtuvo una buena correlación de los datos, evidenciada en el variograma que se presenta en la f*igura 5*; esto es importante debido a que para la variable espesor se generaron resultados muy similares en los diferentes métodos de interpolación. Además, permitió el uso de radios de búsqueda mayores en comparación con los usados convencionalmente para las interpolaciones de tenor.

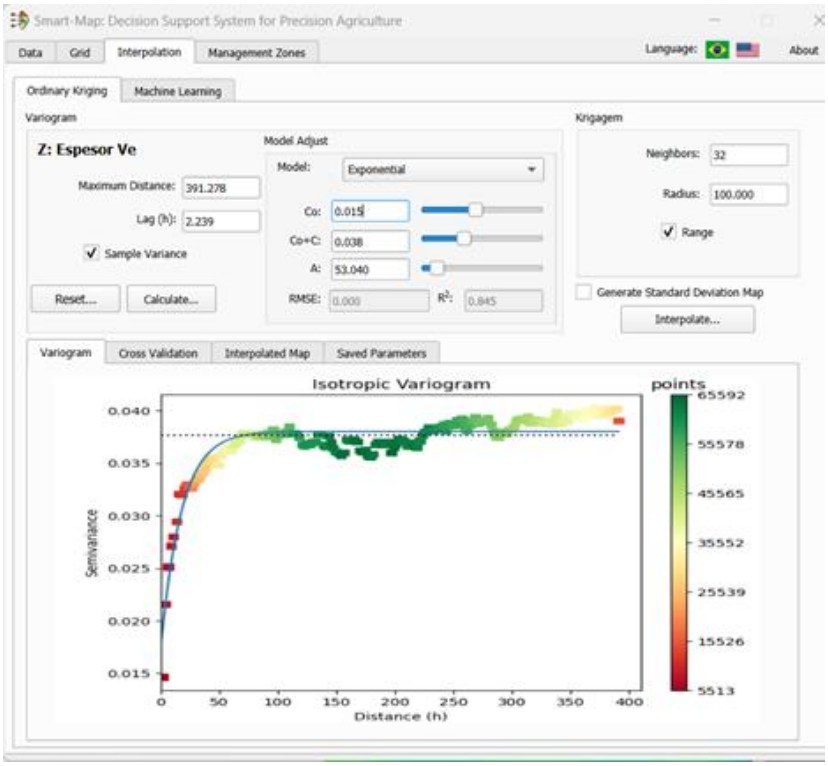


Figura 5 *Variograma del espesor en Kriging ordinario en QGIS.*

En la *figura 6* se muestra el resultado de interpolación de espesor en el software QGIS por Kriging ordinario, con rango de búsqueda de 100m con 32 vecinos.

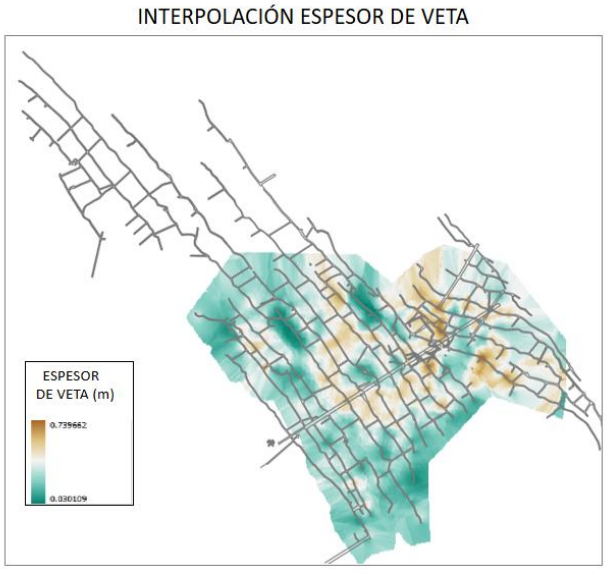


Figura 6 *Interpolación del espesor en Kriging ordinario en QGIS.*

En ArcGIS PRO, por medio de la herramienta “Exploratory Interpolation”, se seleccionó Empirical Bayesian Kriging – Advanced como la interpolación que más se ajustó a los datos (*Figura 7*).

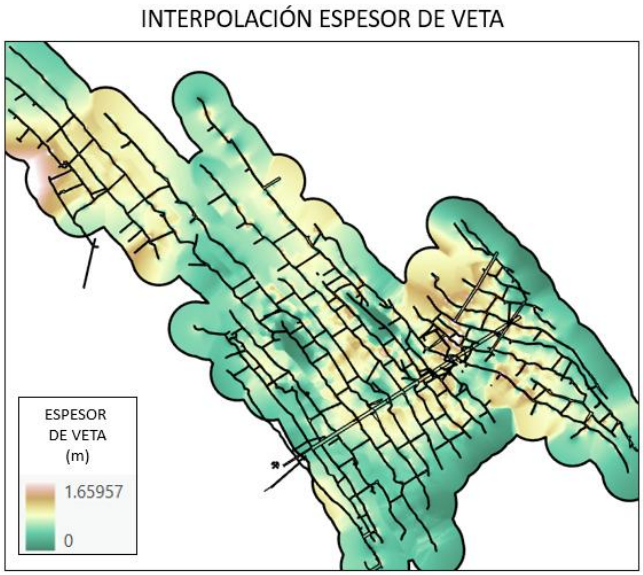


Figura 7 *Interpolación de espesor de veta, método Empirical Bayesian Kriging – Advanced ArcGIS*

Al comparar las *figuras 6 y 7*, se evidencia una alta similitud para las interpolaciones de ambos softwares, siendo los dos efectivos para la estimación de esta variable.

Con el fin de obtener un ráster de buzamiento (pendiente) de la veta, se realizó la interpolación de la altura o coordenada Z de las muestras que componen la base de datos. En la f*igura 8* se muestra el ráster obtenido de buzamiento a partir de la interpolación de la altura, se observa que los valores de cota se reducen en dirección NE, indicando una disposición coherente de la veta, también se observa que la inclinación se encuentra entre 20 – 40 grados.

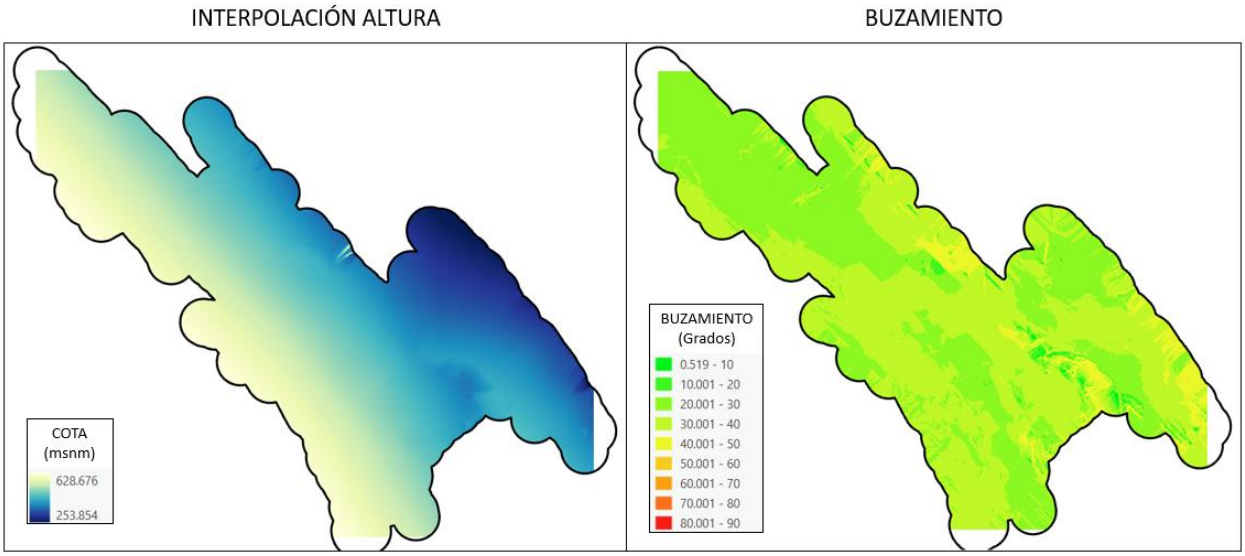


Figura 8 *Interpolación Kriging en ArcGIS pro de la altura y raster de buzamiento.*

En la última etapa, denominada etapa de cálculos, se ejecutaron diferentes procesos de manipulación a través de las herramientas de los software SIG, resaltando el uso principalmente de la calculadora ráster, donde fue procesada la información de las variables base obtenidas de las interpolaciones. En la *figura 9 y 10* se muestra la interfaz de la herramienta calculadora ráster con algunas de las fórmulas utilizadas en ambos software.

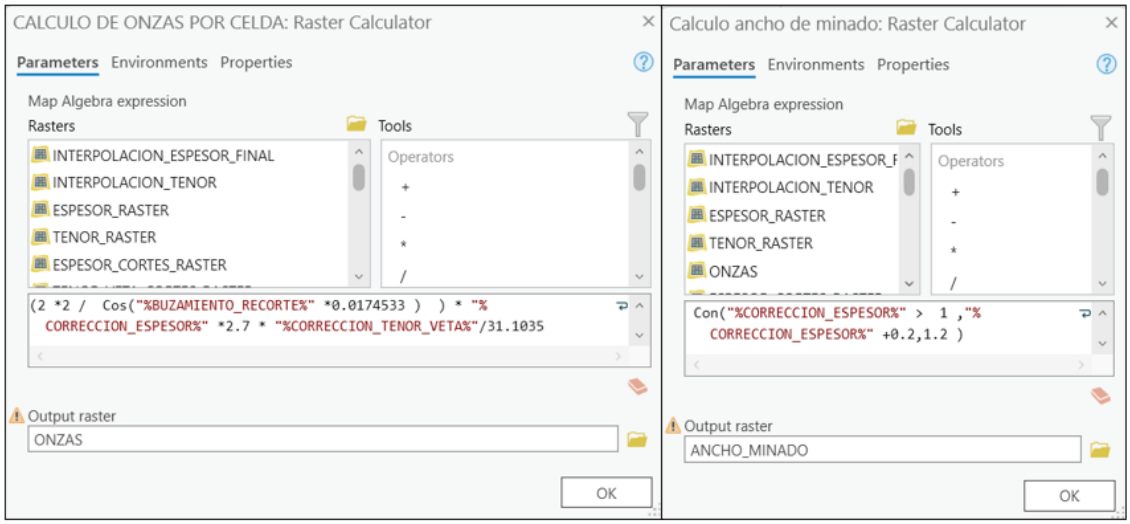


Figura 9 *Cálculos a partir de archivos tipo ráster realizados en ArcGIS Pro.*

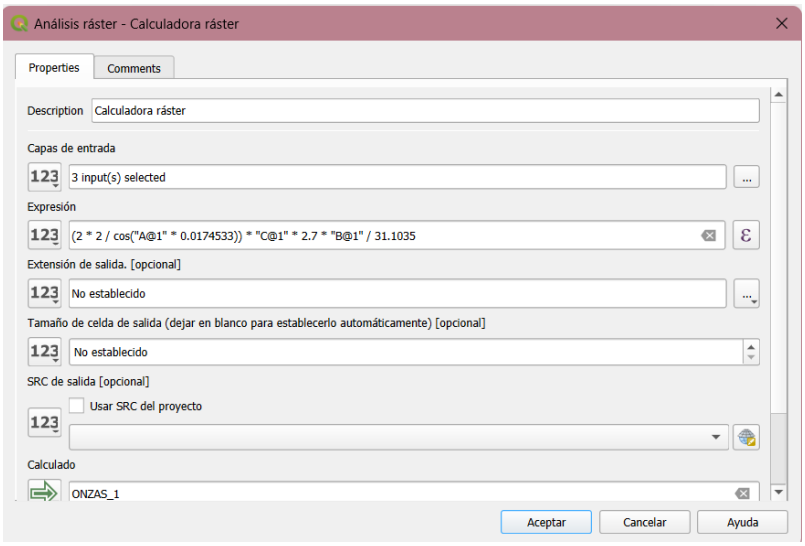


Figura 10 *Ejemplo de cálculo de onzas en QGIS.*

A continuación, se describen los cálculos realizados para la obtención final de las reservas de oro.

Para calcular las reservas en las zonas (polígonos) seleccionadas se utilizaron las siguientes fórmulas, ejecutadas por medio de las calculadoras ráster incluidas en los softwares:

- Cálculo de onzas

$$Onzas = \frac{\frac{Área\ de\ la\ celda}{\cos(buzamiento)} \times espesor \times tenor \times densidad}{31.1035}$$

Se divide entre 31.1035 para convertir partes por millón (ppm) a onzas de oro (una onza troy equivale a 31.1034768 gramos).

- Cálculo de tonelaje

$$Tonelaje = \frac{Área\ de\ la\ celda}{\cos(buzamiento)} \times espesor \times densidad$$

- Ancho de minado

$$Condicional\ (espesor > 1,\ espesor\ + 0.2,\ 1.2)$$

Si el valor del espesor es mayor que 1, se incrementa el espesor en 0.2. Si el valor es 1 o menor, se establece un valor fijo de 1.2 para el ancho de minado.

- Tenor diluido

$$Au\ diluído\ a\ 1.2m\ = \frac{tenor \times\ espesor}{ancho\ de\ \min a\ do}$$

- Aplicación del Cut-off

$$Condicional\ (tenor\ diluído\ < 3,\ 0,\ onzas)$$

Si el tenor diluido es menor a 3 (por debajo del cutoff), el valor de onzas se asigna a 0 (lo que indica que no hay cantidad de oro rentable para ser extraída). Si el tenor diluido es igual o mayor a 3, se mantiene el valor calculado de onzas.

Con base en el oro diluido y un valor de referencia para el cutoff, se calcularon las onzas económicamente viables. Los resultados de los cálculos de reservas se detallan más adelante.

8.4 Automatización del procedimiento para el cálculo de reservas

Para el cumplimiento del objetivo de automatizar el proceso de cálculo de reservas, se realizó la construcción de los modelos de geoprocesamiento por medio de las herramientas ModelBuilder y Model Designer de los software ArcGIS Pro y QGIS. Los modelos de geoprocesamiento consisten en la construcción de un flujo de trabajo de manera esquemática, el cual relaciona los diferentes procesos y sus resultados de forma secuencial, permitiendo definir un procedimiento estandarizado, realizando trabajos complejos y en general repetitivos de una forma fácil y ágil.

Se optó por el uso de ambos software con el fin de tener puntos de comparación respecto a la efectividad de la automatización en estos y para poder contar con opciones tanto de pago como de uso libre para una futura implementación.

Inicialmente fue realizado el proceso de manera manual, con el propósito de identificar el flujo de trabajo y las herramientas a utilizar, posteriormente se realizó la construcción del modelo en ArcGIS y en QGIS, siguiendo la secuencia de herramientas definida previamente. Terminada su construcción se realizaron diferentes corridas de validación, confirmando el correcto funcionamiento de estos modelos.

En la *Figura 11*, se presenta el modelo de geoprocesamiento construido con la herramienta Model Builder de ArcGIS Pro, debido a su tamaño y para un mayor detalle se comparte también como Anexo. (Anexo 1)

El modelo presenta cuatro componentes principales, en figuras azules se encuentran los inputs iniciales (3), en color amarillo las diferentes herramientas de procesamiento (57), y en color verde los archivos que son resultado (63). Adicionalmente, se observan flechas que conectan los diferentes archivos y procesos, siguiendo la dirección de la ruta de trabajo.

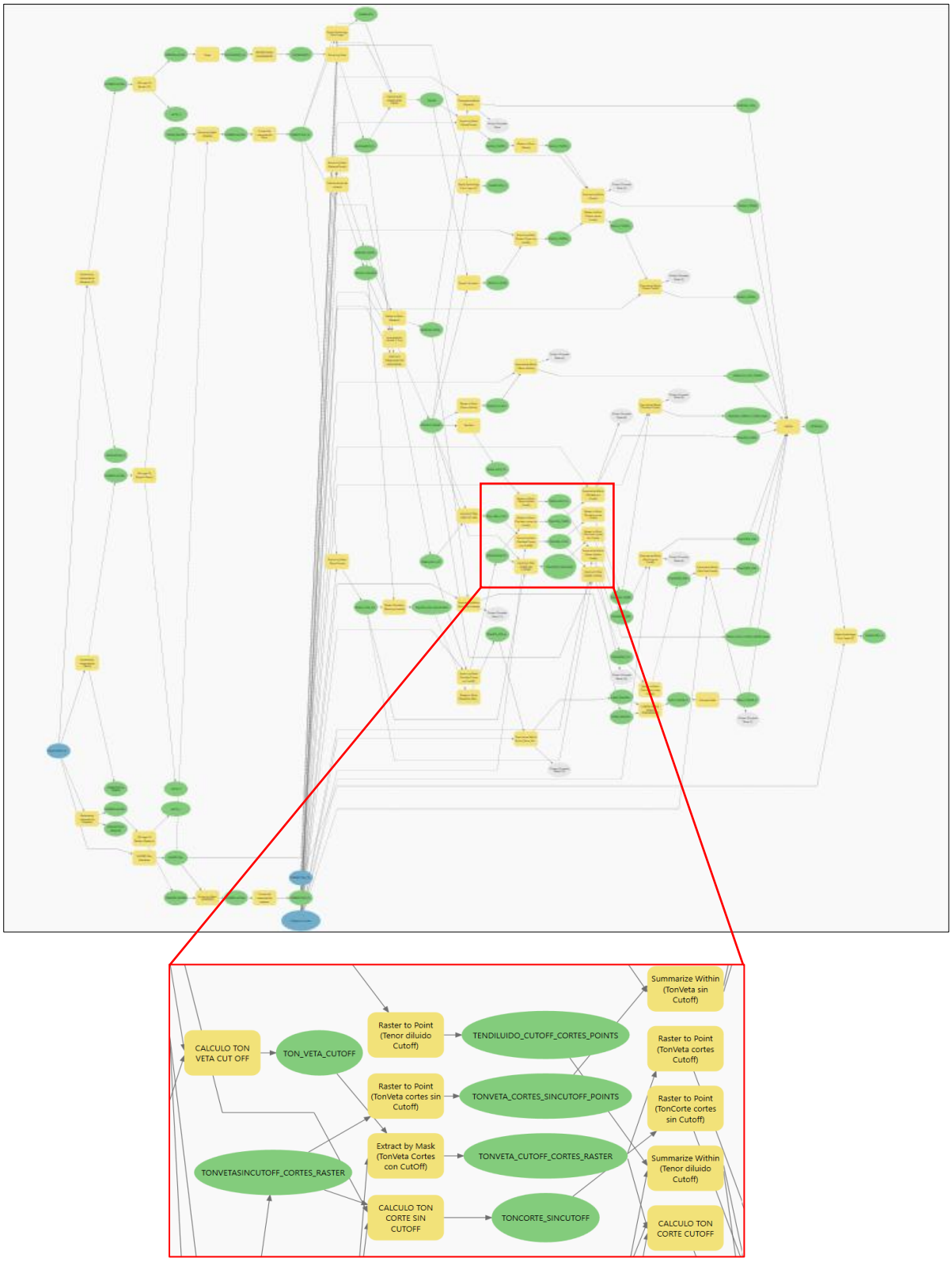


Figura 11 *Modelo de geoprocesamiento en ArcGIS para cálculo de reservas mineras.*

En la *Figura 12* se presenta el modelo de geoprocesamiento construido con la herramienta Model Designer o diseñador de modelos de QGIS, debido a su tamaño y para un mayor detalle se comparte además como Anexo. (Anexo 2)

En el modelo se observan también 4 componentes principales, en los rectángulos de color amarillo vivo se encuentran los inputs iniciales (4), en color amarillo opaco los resultados de los procesos (24) y en recuadros blancos los algoritmos o herramientas (26). Adicionalmente, se observan flechas que conectan el archivo de entrada y salida del proceso.

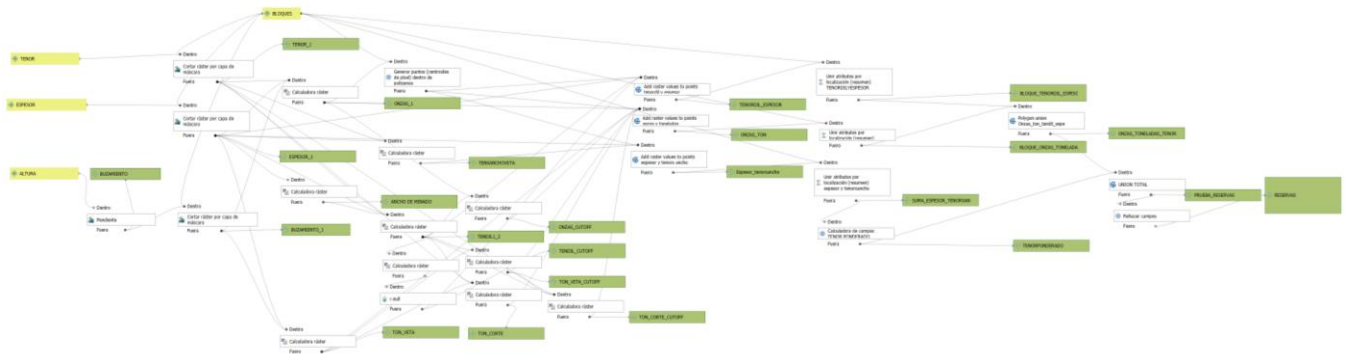


Figura 12 *Modelo de geoprocesamiento en QGIS para cálculo de reservas mineras.*

Los principales pasos que componen los modelos son:

1. Interpolación estadística: En el modelo de ArcGIS Pro se cuenta con la herramienta Exploratory interpolation. Para el software QGIS se realizaron las interpolaciones por separado, previo a ejecutar el modelo de geoprocesamiento, ya que la herramienta para la construcción del modelo en este programa no permite el uso de los plugin de interpolación requeridos.

2. Operaciones ráster: Dentro de las operaciones ráster se realizaron los siguientes procesos.
   - Conversión a formato ráster de la interpolación, se aplicó una máscara limitando el ráster a las zonas circundantes a los datos de muestreo, evitando extrapolación.
   - A través de la calculadora ráster, se realizaron diversas operaciones. Inicialmente, esta herramienta se empleó para corregir los archivos de interpolaciones preliminares. Como regla general, no se permiten valores menores a cero, ya que no son aplicables en el contexto de espesor o contenido de oro. En estos casos, el valor mínimo permitido es cero. Posteriormente, se realizó el cálculo de diferentes parámetros como se describió en el numeral 8.3, los valores principales a calcular fueron: onzas, buzamiento de veta, ancho de minado, tenor de corte o diluido, entre otros.
3. Reporte por bloques: A pesar de contar con los diferentes cálculos, los archivos obtenidos estaban en formato ráster, es decir, en la etapa anterior, la información que fue generada se encontraba dividida en pequeños pixeles, en este caso de 2m. Para la obtención del reporte de reservas, fue necesario extraer la información para los bloques definidos en los cuales se realizó el reporte, para este paso se calcularon las estadísticas para los valores contenidos dentro de cada uno de los polígonos definidos. Entre los valores que se reportaron, se encuentra la suma de Onzas totales del bloque, el promedio de tenor y de espesor de veta, promedio de tenor de corte, toneladas totales del bloque. Los pasos que se siguieron se describen a continuación.

- Generación de centroides (puntos) con su valor correspondiente en cada uno de los pixeles del ráster, dentro de los polígonos definidos.
- Utilización de la herramienta de Estadísticas por zona disponible en QGIS, y la herramienta Summarize whitin en ArcGIS, que permiten hacer un resumen estadístico como media, suma, mínimo, máximo, entre otros de los puntos contenidos en el área especificada.

4. Unión de resultados: La información generada en el paso anterior se encuentra almacenada por separado para cada una de las variables. En este paso se realizó la unión de esta información en un mismo archivo final tipo vector, el cual contó con la tabla de atributos compilados para cada una de las entidades.
5. Visualización: Como paso final se configuró la simbología para una fácil interpretación, se definieron diferentes rangos de tenor de oro, representados en una rampa de colores que permitió observar la variación espacial de este e identificar las zonas de interés. También se definió la simbología para la visualización de características como el espesor de veta o las variaciones en buzamiento.

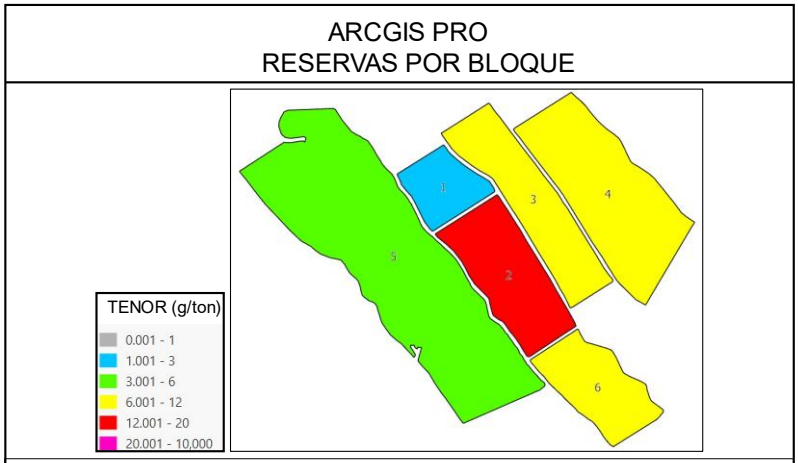
Se resalta que todos los pasos anteriores de ArcGIS y QGIS se encuentran automatizados, permitiendo obtener resultados estandarizados de manera rápida. En este caso, la corrida del modelo en ArcGIS tardó aproximadamente 15 minutos, mientras que, en QGIS, al excluir la interpolación en el modelo, tardó aproximadamente 1 minuto. Si bien esto puede variar en gran medida debido a factores como la cantidad de datos, la capacidad del equipo, la resolución de trabajo, entre otros, igualmente conlleva una

reducción significativa del tiempo, dado que este proceso, realizado manualmente con el uso de software especializados sin herramientas de automatización, puede tardar incluso días.

8.5 Resultados de la prueba piloto de implementación de procedimiento automatizado para cálculo de reservas

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en las pruebas piloto de implementación de los procedimientos construidos en los software ArcGIS PRO y QGIS para el cálculo automatizado de reservas minerales, por medio de métodos geoestadísticos. Para llevar a cabo estas pruebas, se definieron seis bloques delimitados por labores mineras, los cuales se muestran en la *Figura 13*. El reporte de reservas generado en el software ArcGIS PRO se muestra en la *Figura 14* y el reporte generado en QGIS se observa en la *Figura 15*.

Figura 13*Bloques seleccionados para realizar las pruebas piloto.*

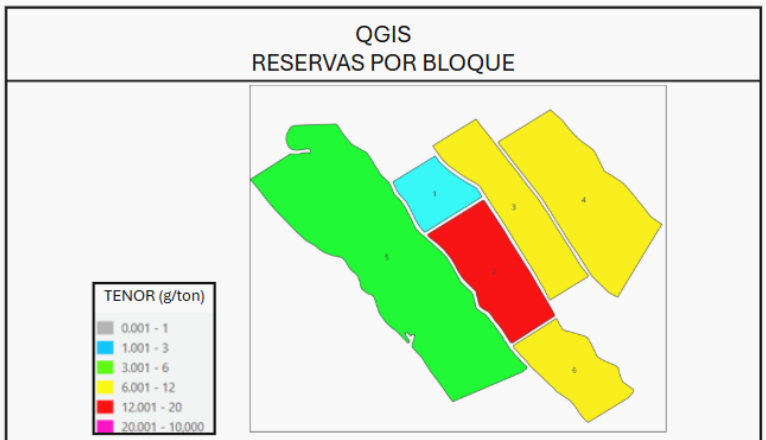


REPORTE DE RESERVAS POR BLOQUE

METODO: ESTIMACIÓN GEOESTADISTICA POR MEDIO DE HERRAMIENTAS DE INTERPOLACIÓN, SOFTWARE ARCGIS PRO

			SIN CUTOFF				CUTOFF: 3g/ton		
BLOQUE	**ANCHO DE VETA (m)**	**TENOR VETA (g/ton)**	**TONELADAS DE VETA**	**TENOR DE CORTE**	**TONELADAS DE CORTE**	**ONZAS TOTALES**	**TENOR DE CORTE CUTOFF (g/ton)**	**TONELADAS DE CORTE CUTOFF**	**ONZAS CUTOFF**
1	0.21	11.51	635.54	2.01	3,644.6	234.92	4.43	641.4	91.5
2	0.39	48.53	2,751.75	15.95	8,372.1	4,290.37	16.80	7,898.2	4,261.8
3	0.39	36.35	2,839.78	11.71	8,827.0	3,310.54	12.29	8,309.6	3,272.9
4	0.44	17.31	5,029.33	6.36	13,682.2	2,800.54	7.14	11,590.4	2,659.3
5	0.25	21.37	6,097.96	4.41	29,424.1	4,239.67	10.65	10,049.1	3,475.8
6	0.38	36.94	1,952.19	11.74	6,135.4	2,346.49	14.75	4,699.7	2,250.6
Total	**0.35**	**27.64**	**19,306.55**	**7.61**	**70,085.55**	**17,222.52**	**11.50**	**43,188.43**	**16,011.83**

Figura 14 *Reporte de reservas generado en el software ArcGIS PRO.*



REPORTE DE RESERVAS POR BLOQUE

METODO: ESTIMACIÓN GEOESTADISTICA POR MEDIO DE HERRAMIENTAS DE INTERPOLACIÓN, SOFTWARE QGIS

	SIN CUTOFF						CUTOFF: 3g/ton		
BLOQUE	ANCHO DE VETA (m)	TENOR VETA (g/ton)	TONELADAS DE VETA	TENOR DE CORTE	TONELADAS DE CORTE	ONZAS TOTALES	TENOR DE CORTE CUTOFF (g/ton)	TONELADAS DE CORTE CUTOFF	ONZAS CUTOFF
1	0.22	14.76	692.45	2.68	3,807.6	374.92	7.03	807.0	278.2
2	0.39	42.48	2,815.84	13.98	8,553.5	3,939.49	14.75	7,594.8	3,878.5
3	0.38	37.94	2,853.34	11.89	9,106.8	3,485.77	12.45	8,053.7	3,430.0
4	0.42	24.65	4,980.57	8.69	14,130.9	3,929.11	9.26	11,595.3	3,744.2
5	0.25	23.30	6,089.03	4.91	28,937.7	4,676.21	8.40	12,907.2	4,187.6
6	0.41	31.17	2,115.55	10.54	6,257.8	2,138.68	12.95	4,060.5	2,042.6
Total	**0.35**	**29.09**	**19,546.78**	**8.03**	**70,794.32**	**18,544.17**	**10.80**	**45,018.37**	**17,561.07**

Figura 15 *Reporte de reservas generado en el software QGIS.*

Como base para el análisis comparativo, se empleó un reporte generado con el software especializado Leapfrog, conocido por sus potentes herramientas de modelado y visualización en 3D, así como por su capacidad de realizar interpolaciones avanzadas, análisis geoestadísticos y estimaciones mediante modelos de bloques, siendo este un referente para estimación de recursos y reservas, generando resultados precisos y de alta calidad. El reporte de reservas para los 6 bloques definidos para el ensayo se muestra en la *Tabla 3*.

Tabla 3 Reporte de reservas generado en el software Leapfrog

REPORTE DE RESERVAS POR BLOQUE									
METODO: ESTIMACIÓN GEOESTADISTICA POR MEDIO DE MODELOS DE BLOQUES, SOFTWARE LEAPFROG									
SIN CUTOFF							CUTOFF: 3g/ton		
BLOQUE	ANCHO DE VETA (m)	TENOR VETA (g/ton)	TONELADAS DE VETA	TENOR DE CORTE	TONELADAS DE CORTE	ONZAS TOTALES	TENOR DE CORTE CUTOFF (g/ton)	TONELADAS DE CORTE CUTOFF	ONZAS CUTOFF
1	0.24	11.57	609.2	2.56	2,756.6	226.5	7.11	680.5	155.5
2	0.33	56.48	2,090.8	16.27	7,259.5	3,796.9	17.80	6,522.9	3,732.8
3	0.36	47.83	2,354.7	14.92	7,550.5	3,621.2	17.72	6,188.3	3,526.5
4	0.42	19.04	4,717.0	6.63	13,540.7	2,886.8	10.51	7,718.3	2,608.5
5	0.31	29.00	5,417.1	9.79	16,040.5	5,051.3	18.06	7,853.3	4,560.6
6	0.34	48.42	1,615.7	13.92	5,618.4	2,515.0	31.66	2,383.4	2,425.7
Total	**0.35**	**33.50**	**16,804.40**	**10.67**	**52,766.11**	**18,097.62**	**16.88**	**31,346.80**	**17,009.65**

Inicialmente se observó que los valores obtenidos en los software SIG son similares, presentando una diferencia en las onzas totales de únicamente el 4.8% en el caso de ArcGIS PRO (*Figura 14*) y de 2.5% para el reporte generado en QGIS (*Figura 15*), aprobando inicialmente el uso de estos software para este fin. Adicionalmente, en atributos como el ancho de veta para el caso de ArcGIS y QGIS si bien en algunos bloques se observan variaciones, la diferencia máxima observada es de 7cm, lo que no representa una diferencia importante, además el promedio ponderado de este para ambos software tuvo una diferencia de 0%, demostrando la efectividad de las interpolaciones en los software.

En cuanto a las estimaciones de tenor, presentan mayores diferencias en comparación con las estimaciones del espesor, siendo mayores los valores obtenidos en QGIS. Se observa una correspondencia adecuada entre las variaciones de los tenores en los diferentes software, mostrando en los 3 casos un orden correcto en los tenores de los bloques evaluados, es decir, los bloques con mayor tenor para el cálculo en ArcGIS (*Figura 14*) y QGIS (*Figura 15*) son los mismos que en el reporte del software especializado, y de igual manera se observa correspondencia en los bloques de menor tenor. La diferencia en los valores de tenor es posiblemente debida a que en el caso de Leapfrog se definen con herramientas geoestadísticas, dominios (áreas definidas por el

profesional estimador, de acuerdo con su experticia) de alto tenor y bajo tenor, generando una estimación más exacta, el proceso de definición de dominios no se realizó para los software SIG.

Otro factor importante por considerar es la visualización de la distribución del mineral, en las siguientes figuras (*Figura 16, Figura 17, Figura 18, Figura 19)* se muestran las interpolaciones obtenidas para el tenor de veta y tenor de corte.

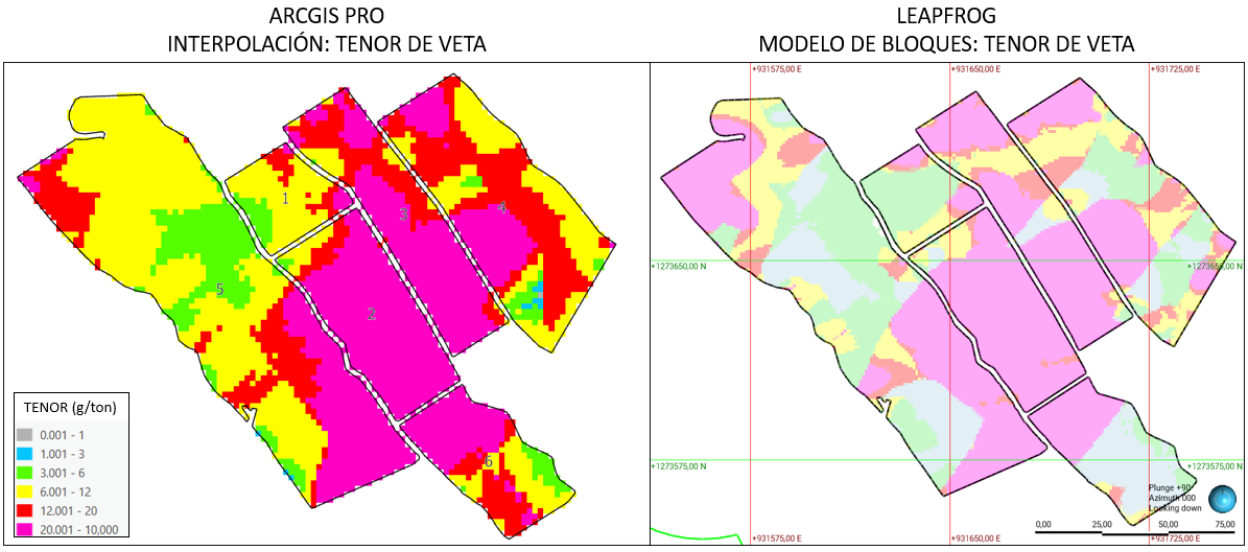


Figura 16 *Interpolaciones de tenor de veta ArcGIS Pro vs Leapfrog.*

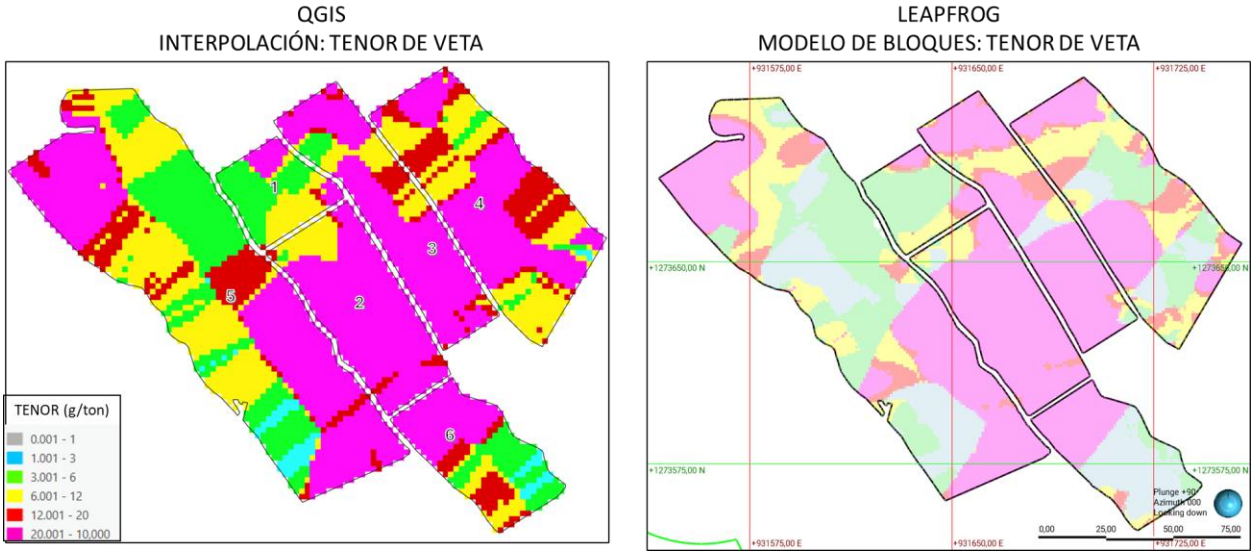


Figura 17 *Interpolaciones de tenor de veta QGIS vs Leapfrog.*

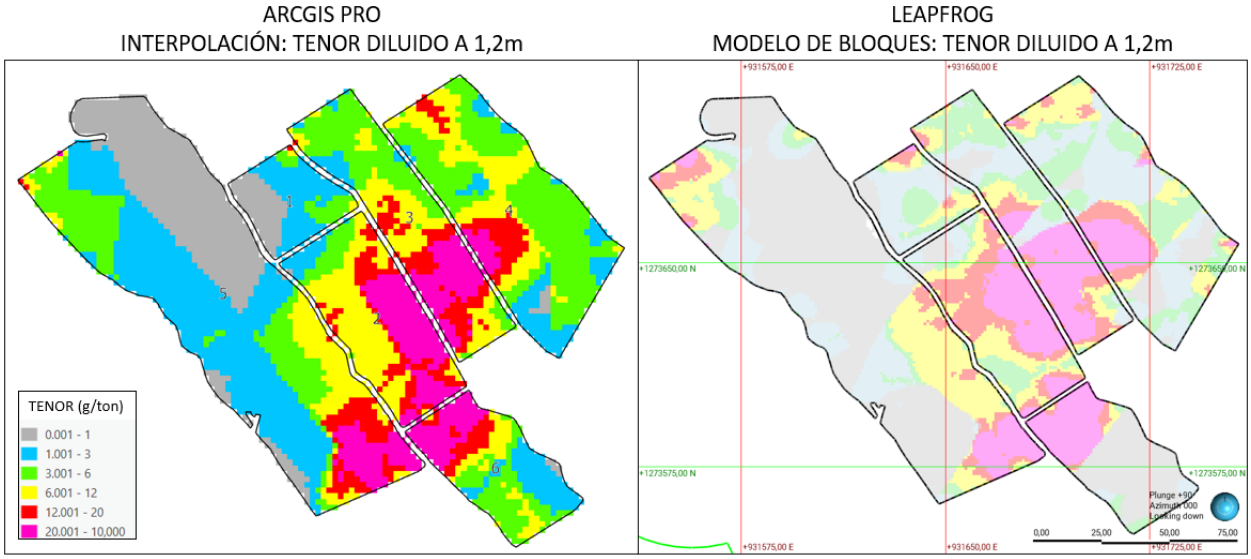


Figura 18 *Interpolaciones de tenor de corte ArcGIS Pro vs Leapfrog.*

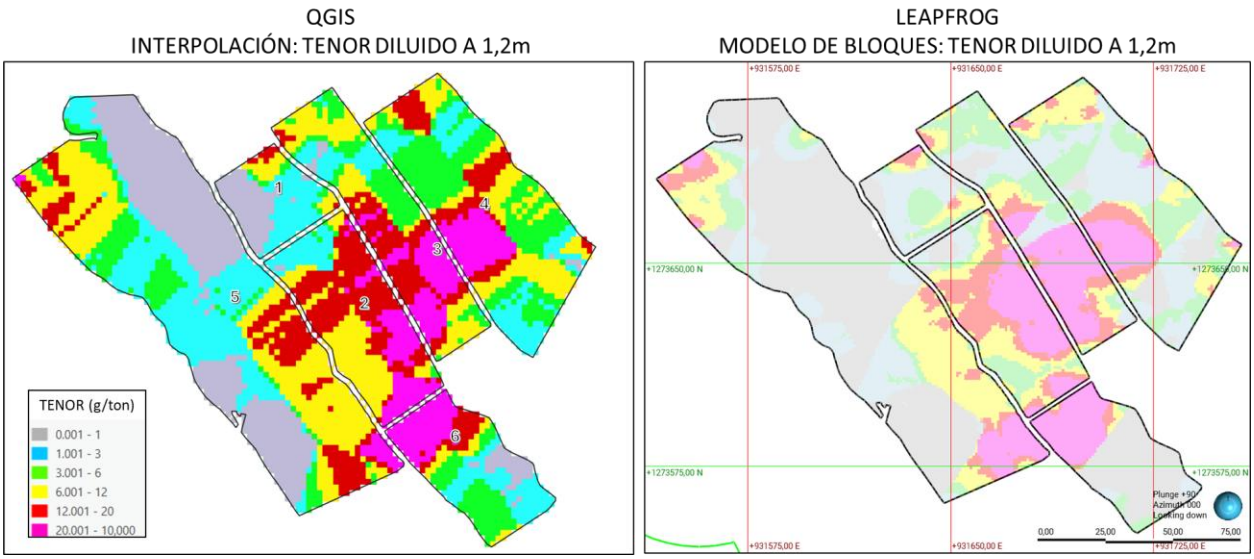


Figura 19 *Interpolaciones de tenor de corte QGIS vs Leapfrog.*

A simple vista se observa alta similitud en la distribución espacial de los valores de oro entre las estimaciones realizadas en los diferentes software. Las mayores diferencias, se presentan en las zonas de bajo tenor, en las cuales para el caso de los software SIG se tienen valores más altos respecto al modelo en Leapfrog (*Figuras 16 y 17*, bloque 5), debido también a ausencia de definición de dominios de alto y bajo tenor, lo que genera una mayor influencia de los valores de alto tenor en las zonas de bajo tenor y viceversa.

Sin embargo, la posición de las zonas de alto tenor es muy similar, permitiendo identificar en todos los casos las zonas de interés para el planeamiento y el posterior minado. Por ejemplo, en el caso de aplicar un filtro con el cut-off definido para el ensayo de 3g/ton (*Figura 20 y 21*), en los tres casos se conservan las mismas áreas, permitiendo identificar con exactitud el mineral económicamente explotable.

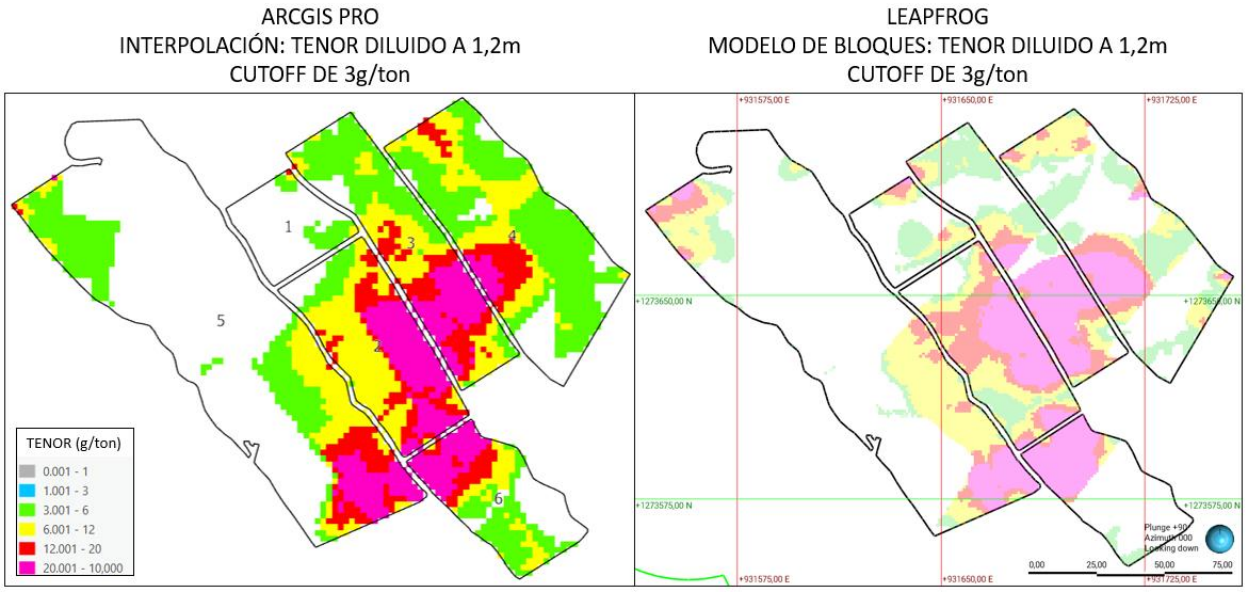


Figura 20 *Interpolaciones de tenor de corte con cutoff de 3g/ton ArcGIS vs Leapfrog.*

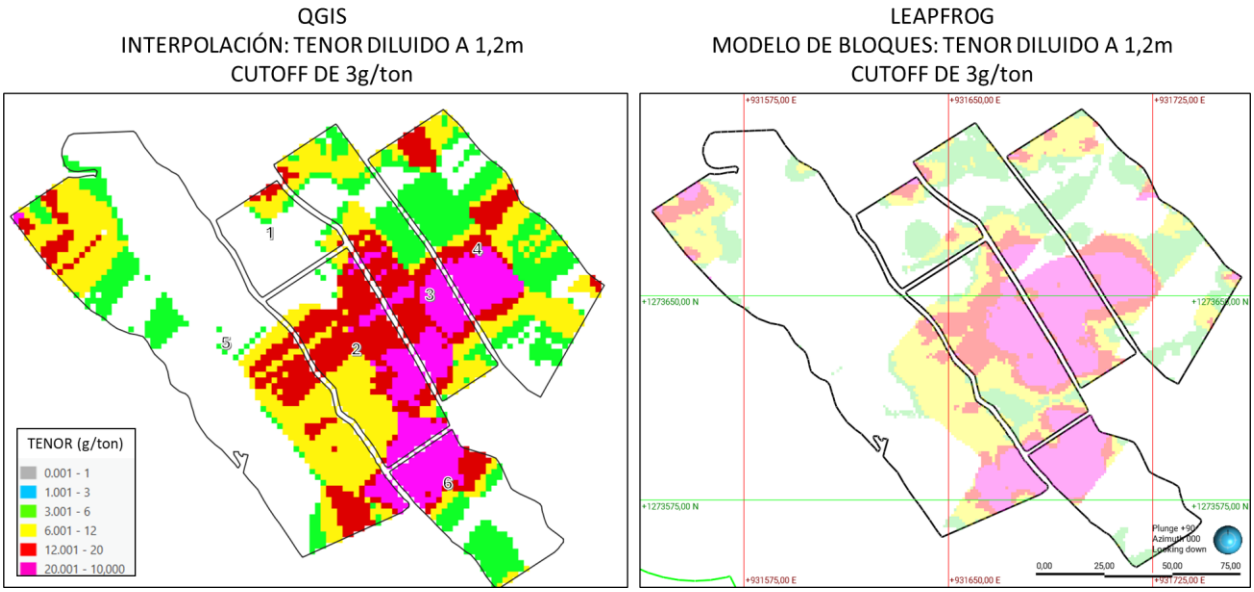


Figura 21 *Interpolaciones de tenor de corte con cutoff de 3g/ton QGIS vs Leapfrog.*

La mayor diferencia observada en el reporte de las reservas de los bloques en los tres software se encuentra en las toneladas de corte y las toneladas de corte por encima del cut-off. Como se ha mencionado anteriormente, en Leapfrog se puede delimitar zonas

de alto tenor mediante envolventes, separándolas de las zonas estériles, lo que permite una distinción entre los dominios de alto y bajo tenor. Esta delimitación, como se expuso previamente, no se realizó en ArcGIS y QGIS, por lo que las muestras de alto tenor influyen sobre las zonas de bajo tenor, ocasionando que algunas áreas queden por encima del cut-off. Como resultado, las toneladas de corte calculadas en ArcGIS y QGIS son más altas, alcanzando alrededor de 70,000 toneladas, en comparación con las 52,000 toneladas calculadas en Leapfrog.

9. Discusión

El desarrollo de un modelo automatizado para el cálculo de reservas mineras en vetas de oro mediante herramientas SIG representa un avance significativo en la optimización de procesos tradicionalmente complejos y de alta demanda de recursos. Este proyecto abordó los retos inherentes a la implementación de metodologías geoestadísticas en un entorno digital, logrando establecer un flujo de trabajo robusto y replicable.

El uso combinado de ArcGIS Pro y QGIS permitió evaluar las capacidades de ambos software en términos de automatización y rendimiento. ArcGIS Pro, con su herramienta "Exploratory Interpolation"(Interpolación exploratoria), demostró ventajas en la integración de métodos geoestadísticos, al permitir una selección automática del método de interpolación más adecuado. Sin embargo, su dependencia de licencias comerciales puede limitar su accesibilidad en algunos entornos. Por otro lado, QGIS, como software libre, presentó opciones altamente personalizables y una capacidad destacada para incorporar técnicas avanzadas, como algoritmos de aprendizaje automático. Aunque su interfaz es menos intuitiva en algunos casos, su adaptabilidad lo convierte en una alternativa viable para futuras implementaciones.

La automatización del proceso representó un ahorro sustancial en tiempo y esfuerzo en contraste con el tiempo requeridos en procedimientos manuales. Esta reducción no solo mejora la eficiencia, sino que también minimiza errores humanos al estandarizar los pasos y garantizar consistencia en los resultados.

Entre los principales desafíos enfrentados durante el desarrollo se encuentran:

- **Gestión de datos complejos:** La necesidad de trabajar con grandes volúmenes de datos georreferenciados y realizar cálculos intensivos. Esto fue mitigado mediante la optimización de operaciones ráster y el uso de hardware adecuado para el procesamiento.
- **Estandarización de resultados:** Se diseñaron simbologías claras y protocolos específicos para garantizar una interpretación consistente de las salidas gráficas y tabulares.

Aunque el modelo desarrollado demuestra una capacidad sólida para calcular reservas de manera automatizada, existen áreas que podrían beneficiarse de un mayor refinamiento:

1. **Validación con datos reales:** Aunque el modelo fue probado con datos históricos, una validación más extensa con datos recientes y directamente recolectados en campo fortalecería su precisión y aplicabilidad.
2. **Integración de variables adicionales:** La incorporación de parámetros como la mineralogía y las características estructurales de la veta podría enriquecer los resultados.
3. **Escalabilidad:** Evaluar el rendimiento del modelo en depósitos de mayor tamaño o con diferentes configuraciones geológicas es crucial para garantizar su aplicabilidad en diversos contextos mineros.

10. Conclusiones

- Los resultados obtenidos al comparar las reservas obtenidas los software GIS (ArcGIS y QGIS) con respecto a Leapfrog, un software especializado, demuestran que los valores generados en los SIG son similares y técnicamente confiables. La diferencia en las onzas totales es únicamente del 4.8 % para ArcGIS Pro y del 2.5 % en el caso de QGIS, lo que valida el uso de estos software SIG como alternativas prácticas y accesibles para este tipo de análisis.
- La automatización por medio de la combinación de herramientas SIG y geoestadística permite realizar cálculos de reservas en distintas áreas con mínima intervención manual, ya que logra integrar todas las variables espaciales, lo cual genera estimaciones confiables que se pueden adaptar a las condiciones reales de cada depósito, a su vez, asegura consistencia en el procedimiento, por lo que es posible replicarlo, disminuyendo la posibilidad de errores manuales.
- El modelo de geoprocesamiento permite ejecutar de manera rápida procesos repetitivos extensos, disminuyendo en gran medida el tiempo convencionalmente empleado sin sacrificar la confiabilidad del proceso.
- El uso de **Model Builder** en ArcGIS Pro y **Model Designer** en QGIS presenta diferencias en la experiencia del usuario. La interfaz de ArcGIS Pro es más intuitiva para construir modelos de forma progresiva y especialmente visual, en contraste con QGIS que no cuenta con un diseño automático, por lo que se necesita tener un alto nivel de orden mientras se construye el modelo, además, presenta limitaciones para integrar algunos complementos específicos, por lo que no están disponibles en el

momento de automatizar. Cabe mencionar que herramientas como **la "Calculadora Ráster",** asigna letras genéricas (A, B, C, etc.) dependiendo el orden de la selección de las capas a trabajar, lo que puede generar confusión, especialmente en procesos complejos. Para mitigar esta situación, se documentó detalladamente las capas utilizadas, el orden en que se seleccionaron y los pasos del flujo de trabajo.

- Al aplicar metodologías de interpolación geoestadística, es posible incorporar la variabilidad espacial de las características principales de los depósitos, en este caso el espesor y ancho de veta. Estas características son las que determinan realmente la distribución espacial del contenido de oro, permitiendo obtener no solo un cálculo exacto de cantidades, sino además una distribución espacial más realista.
- Al tenerse mayor certeza de la distribución del contenido de oro será posible una evaluación de viabilidad y un planeamiento más eficiente del proyecto minero.
- Tanto el software ArcGIS PRO como QGIS son opciones efectivas para la automatización del proceso de cálculo de reservas, en el caso de ArcGIS PRO se cuenta con la ventaja de una mayor facilidad al momento de la construcción del modelo de geoprocesamiento además de herramientas de comparación automatizada de métodos de interpolación, en comparación QGIS presenta opciones de interpolación adicionales como el Machine learning, que muestran buena efectividad, además de ser un software libre.
- El comportamiento de las interpolaciones se ajusta de manera efectiva en los sectores cercanos a labores mineras, los cuales contaba con un muestreo detallado, en el caso de las extrapolaciones, después de una distancia mayor a 50m respecto a las muestras,

se observó un comportamiento anómalo, con desparrame de valores altos, lo que podría generar interpretaciones erróneas.

- En QGIS al utilizar SmartMap (Kriging ordinario y Machine learning) e IDW, se concluye que el Kriging ordinario, es adecuado para interpolar hasta 5000 muestras, su capacidad para analizar los datos y ajustarlos a un semivariograma permitió ahorrar tiempo en la determinación de los parámetros y es especialmente útil en depósitos erráticos con tendencias complejas. Por otro lado, IDW, implementado a través del complemento GDAL fue una opción eficiente para mayor volumen de datos, en este caso trabajando con más de 8000 datos. Además, al definir el radio de búsqueda del vecino más cercano para la interpolación de IDW, se restringe el área y no presenta el efecto de "desparrame" que se observa en el Kriging. Sin embargo, en Kriging ordinario este efecto se puede controlar con un buffer de hasta 50 metros de las muestras.
- La integración de técnicas de geoestadística y herramientas SIG no solo permite optimizar el cálculo de reservas, sino que también habilita una evaluación más dinámica y adaptable a diferentes escenarios geológicos. Esta flexibilidad ofrece una ventaja competitiva, ya que el modelo desarrollado puede adaptarse fácilmente a nuevas áreas de estudio o depósitos con características distintas, simplemente ajustando parámetros como métodos de interpolación, resoluciones ráster, o límites de enmascarado, lo cual refuerza su utilidad como herramienta versátil para la planificación y toma de decisiones en proyectos mineros.

11. Recomendaciones

- Se deben considerar las incertidumbres inherentes del desarrollo del modelo, por lo cual, es importante incorporar múltiples simulaciones del proceso desarrollado para facilitar la captura de posibles variaciones en la geometría o en la ley del depósito.
- Realizar pruebas con los distintos métodos de interpolación disponibles en ArcGIS y QGIS e ir ajustando los parámetros gradualmente hasta encontrar la interpolación que mejor se adapte al comportamiento del depósito. A medida que se obtengan más muestras, es posible reajustar el modelo para reflejar mejor la variabilidad del depósito, pero se debe evitar cambiar el método demasiado frecuente para asegurar la consistencia del modelo.
- Comprobar la efectividad de las interpolaciones en las zonas alejadas con la inclusión de información de sondajes, para futuros proyectos.
- Al usar Smart Map es importante un área que tenga menos de 5,000 muestras para evitar el proceso de resampled points, que descarta datos al exceder este límite y puede afectar la precisión. Se recomienda si es necesario dividir los datos por sectores, teniendo claro que la interpolación por sectores podría alterar la correlación entre los límites de estos, en comparación con resultados obtenidos al usar otro método que permita interpolar toda la base de datos de forma continua.
- Para QGIS se recomienda inicialmente realizar las interpolaciones con el complemento de **SmartMap**, ya que este plugin sugiere automáticamente parámetros óptimos para los cálculos, lo que facilita el proceso sin requerir un nivel avanzado de experiencia en la

configuración y posteriormente, utilizar **QGIS Model Designer** donde están automatizados los cálculos a partir de los archivos ráster obtenidos, lo que permite generar resultados estandarizados rápidamente. Aunque la interpolación como **IDW** (Inverse Distance Weighting) disponible en el complemento GDAL es una alternativa compatible que se puede incluir directamente en **Model Designer**, esta requiere mayor experiencia para definir los parámetros adecuados.

- Si el proyecto está en una fase inicial y cuenta con un presupuesto limitado o se requiere una mayor flexibilidad en la manipulación de datos, QGIS es una buena elección. Por otro lado, si es necesario utilizar herramientas avanzadas específicas y un soporte técnico constante, se recomienda ArcGIS. A pesar de ello ambos software presentan herramientas útiles y la elección depende de las necesidades y objetivos del proyecto.

12. Referencias

Afeni, T. B., Akeju, V. O., & Aladejare, A. E. (2021). A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit. Geoscience Frontiers, 12(1), 243-253.

Agencia Nacional de Minería. (n.d.). ECRR: Español versión final. Agencia Nacional de Minería. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ecrr_espanol_version_final.pdf

Agencia Nacional de Minería. (2021). Guía de buenas prácticas para la Exploración y estimación de recursos y reservas de materiales de arrastre. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/guia-materiales-de-arrastre.pdf

Agencia Nacional de Minería. (2017). Código Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, Estimación y clasificación de recursos minerales y reservas mineras. Vicepresidencia de Seguimiento, Control y Seguridad Minera. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/ccrr_v1.docx.pdf

Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code) [online]. Available from: (The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and

Minerals Council of Australia).
https://www.jorc.org/docs/JORC_Code_2012_Spanish_translation_March_2018.pdf

Báez Castro, B. B. (2018). Metodología geoestadística aplicada a la estimación de recursos de la veta Bertha San Miguel de Cauri-Lauricocha-Huánuco.

Bonelli, M. (2022). Crear mapas interpolados con Smart Map en QGIS. GeoAgro. Recuperado el 15 de noviembre de 2024, de https://support.geoagro.com/es/kb/crear-mapas-interpolados-con-smart-map-en-qgis/

Burrough, P. A. (1990). Principles of geographical information systems. Oxford University Press.

Carvalho, D. (2018). Probabilistic resource modeling of vein deposits.

SRK Consulting. (2024). Informes técnicos para códigos de minería internacionales. SRK Consulting. https://www.srk.com/es/servicios/informes-tecnicos-para-codigos-de-mineria-internacionales

Castañón, C., Arias, D., Diego, I., Martin-Izard, A., & Ruiz, Y. (2017). Resource and Reserve Calculation in Seam-Shaped Mineral Deposits; A New Approach:“The Pentahedral Method”. Minerals, 7(5), 72.

Chiles, J.-P., & Delfiner, P. (1999). Geostatistics: Modeling spatial uncertainty. Wiley.

Combined Reserves International Reporting Standars Commitee (CRIRSCO). (2003). Progress on International Standars for Reporting of Mineral Resources and Reserves.

Comisión Colombiana de recursos y reservas minerales. (2018). Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ecrr_espanol_version_final.pdf

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas. (n.d.). Comisión Colombiana de Recursos y Reservas. https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/

Da Silva, H. M. (1993). Geostatistics Applied to a Vein-type Deposit-A Case Study (Master's thesis, Montana Tech of The University of Montana).

Dominy, S. C., Annels, A. E., Camm, G. S., Cuffley, B. W., & Hodkinson, I. P. (1999). Resource evaluation of narrow gold-bearing veins: Problems and methods of grade estimation. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy-Section A-Mining Industry, 108, A52.

Fernández, C. C., Izard, A. M., Álvarez, I. D., & Prieto, D. A. (2020). Nuevo método de cálculo de recursos y reservas minerales para cuerpos minerales de forma tabular: Aplicación al proyecto Carlés. In Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir. Libro jubilar del profesor Jorge Loredo (pp. 83-92). Ediciones de la Universidad de Oviedo.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. McGraw-Hill Interamericana Editores. https://www.digitalrepositorio.com/files/original/97a5883a1d6106e6ac908afd7ea838d1.pdf

Huaman Maque, V., & Nina Huamani, S. R. (2016). Análisis geoestadístico en la Veta Esperanza 2001 en la UEA mina recuperada de la compañía de minas Buenaventura S.A.A. Huancavelica.

Joint Ore Reserves Committee of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia (JORC), 2012. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code) [online]. Available from: (The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia). https://www.jorc.org/docs/JORC_Code_2012_Spanish_translation_March_2018.pdf

Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). Mining geostatistics. Academic Press.

López, V. (2003). Fundamentos para la explotación de minas. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Ludeña Cabellos, L. V. (2021). Modelamiento, cálculo de reservas y diseño de Pit Final, mediante el procesamiento de data de perforación diamantina en un depósito porfirítico, distrito Cashapampa-Ancash 2020.

Meza, D. (2017). Metodología para el Cálculo de reservas en minas a cielo abierto utilizando drones [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Pereira, G. W., Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. d., Coelho, A. L. d. F., Costa, M. M., & Grift, T. (2022). Smart-Map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. Agronomy, 12(6), 1350. https://doi.org/10.3390/agronomy12061350

Popoff, C. (1966). Computing reserves of mineral deposits: principles and conventional methods. United States Department of the Interior, Bureau of Mines.

Pysmennyi, S., Peremetchyk, A., Chukharev, S., Fedorenko, S., Anastasov, D., & Tomiczek, K. (2022, June). The mining and geometrical methodology for estimating of mineral deposits. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1049, No. 1, p. 012029). IOP Publishing.

Quispe Huaman, R. M. (2022). Evaluación geológica para el cálculo de reservas y estimación de recursos minerales del proyecto Alpacay, Arequipa-Perú.

Servicio Geológico Colombiano. (2020). Resolución 100 del 17 de marzo de 2020. https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/BIM/Documents/Resolucion-100-del-17-marzo-2020.pdf

Servicio Geológico Mexicano. (2017). Aplicaciones de la Geología, Yacimientos minerales. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Yacimientos-minerales.html

Shenavar, M., Ataee-pour, M., & Rahmanpour, M. (2021). Evaluation of underground mineable reserve in presence of grade and commodity price uncertainties. Journal of Mining and Environment, 12(2), 385-396.

Strukov, K., Nikiforova, I., Lavenkov, V., & Iun, Y. (2018). Choosing the method of excavating vein reserves and mineralized zones on the basis of simulation modeling. In E3S Web of Conferences (Vol. 56, p. 01018). EDP Sciences.

Torabi, S. A., & Choudhary, B. S. (2017). Conventional and computer aided ore reserve estimation. International journal of engineering technology science and research, 4(12), 896.

Torres-Sanchez, V., Olivas-Maldonado, P., Diaz-Huaina, G., Raymundo-Ibañez, C., & Perez, M. (2020, February). Optimized Method of Estimating Mineral Reserves Using the O'Hara Mathematical Model for Underground Mining in Peru. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 758, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.

Vega Oyola, A. G. (2013). Cálculo de reservas de la veta" paraiso" mina paraiso-distrito Ponce Enriquez (Bachelor's thesis).

Williams, C. T. P. (1985). Ore estimation and mine planning at Panasqueira, Portugal (Doctoral dissertation, University of London).