

**CÁLCULO DE RESERVAS Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS DE ORO EN LA MINA
PROVIDENCIA DE GRAN COLOMBIA GOLD**

Diego León Arango Hernández

Maria Camila Rentería Cárdenas

**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

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2022

RESUMEN

Se realizó el cálculo y estimación de recursos y reservas en un sector de la mina *Providencia*, -ubicada en el municipio de Segovia, Antioquia, propiedad de *Gran Colombia Gold*, compañía minera que explota un yacimiento de oro en vetas- a través de un análisis geoestadístico con herramientas SIG, considerando los datos de muestreo en canales y perforaciones diamantinas debidamente georreferenciados. Este análisis incluyó la estructuración de la base de datos espacial, la generación de modelos tridimensionales de veta y el estudio espacial de la variable contenido de oro (Au) en el área de estudio; lo anterior, con el fin de obtener un modelo de bloques que sirva como herramienta para el planeamiento minero.

Palabras clave: Geoestadística, Recursos Minerales, Modelo de Bloques, Cálculo de Reservas.

ABSTRACT

For this project was carried out the calculation and estimation of resources and reserves in a sector of the Providencia mine, owned by *Gran Colombia Gold*, company that exploits a quartz vein gold deposit. Through a geostatistical analysis with GIS tools that was carried out on the channel sampling data and diamond drillings sampling data that were duly georeferenced. This included the structuring of the spatial database, the generation of three-dimensional vein models and the spatial study of the variable gold content (Au) in the study area; this in order to obtain a block model that serves as a tool for mining planning.

Keywords: Geostatistical, Mineral Resources, Block Model, Reserves Calculation

CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	11
1.1.Descripción área problemática.....	11
1.2.Formulación del problema.....	11
1.3.Justificación.....	11
2. OBJETIVOS	13
2.1.Objetivo General	13
2.2.Objetivo Específico.....	13
3. ANTECEDENTES	14
3.1.Metodologías para el cálculo y estimación de recursos y reservas minerales.....	14
3.2.La importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la geoestadística	21
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	26
5. GLOSARIO	27
6. REFERENTE TEÓRICO	31
6.1.Generalidades.....	31
6.1.1. Localización	31
6.1.2. Vías de acceso	32
6.1.3. Economía.....	32

6.1.4.	Clima.....	33
6.1.5.	Fisiografía.....	33
6.1.6.	Geología.....	33
6.1.6.1.	<i>Geología Regional</i>	33
6.1.6.2.	<i>Geología Local</i>	34
6.2.	Geoestadística	35
6.2.1.	Compositación.....	36
6.2.2.	Análisis explotario de datos (EDA)	36
6.2.3.	Caping.....	37
6.2.4.	Análisis Estructural	38
6.2.5.	Interpolación.....	39
6.2.6.	Modelo de Bloques	39
7.	METODOLOGÍA	40
7.1.	Tipo de trabajo	40
7.2.	Procedimiento	40
7.2.1.	Planteamiento del proyecto	41
7.2.2.	Etapa de investigación	41
7.2.3.	Análisis geoestadístico de los datos	41
7.2.4.	Integración de un SIG	42
7.2.5.	Implementación del sistema	43

8. RESULTADOS	44
8.1.Base de datos	44
8.2.Modelo Geológico	45
8.3.Compositación.....	46
8.4.Análisis exploratorio de datos (EDA).....	48
8.5.Definición de dominios.....	52
8.6.Caping (Tratamiento de valores anómalos)	54
8.7.Análisis Estructural.....	55
8.8. Interpolación y validación del modelo.....	57
8.9. Categorización del recurso	62
8.10. Reporte de recursos.....	63
8.11. Reporte de Reservas	65
9. CONCLUSIONES	68
10. RECOMENDACIONES.....	70
11. BIBLIOGRAFÍA	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica de dispersión con un valor atípico, tomado de Minitab, (s.f.)	16
Figura 2. Gráfico de caja con dos valores atípicos tomado de Minitab, (s.f.)	16
Figura 3. Ubicación del DMSR. Tomado de SRK Consulting, 2013	32
Figura 4. Proceso de compositación de sondajes. Elaborado en PowerPoint	36
Figura 5. Principales elementos del Semivariograma. Tomado de Betancur, et al. (2007)	38
Figura 6. Concepto y ejemplo de un modelo de bloques. Tomado de Choque, (2020)	39
Figura 7. Flujoograma de metodología. Elaborado en PowerPoint	40
Figura 8. Modelo Entidad-Relación. Elaborado en PostgreSQL	45
Figura 9. Modelo de veta en la mina Providencia, vista en planta y vista isométrica respectivamente. Elaborado en Leapfrog Geo	46
Figura 10. Modelos de veta en la mina Providencia, vista en planta y vista isométrica respectivamente. Elaborado en Leapfrog Geo.	47
Figura 11. Dirección preferencial, en la que se concentran las altas leyes (Oreshoot) y se evidencian dos líneas con tendencia aproximada de N45E. Elaborado en io-GAS	48
Figura 12. Histogramas y estadística básica	49
Figura 13. Diagrama de caja y Diagrama de caja en escala logarítmica. Elaborado en io- GAS	50
Figura 14. Pie Chart. Elaborado en io-GAS	50
Figura 15. Nube direccional. Elaborado en io-GAS	51
Figura 16. Gráfico de probabilidad de datos originales. Elaborado en io-GAS	51

Figura 17.Gráfico de probabilidad de datos transformados con función logarítmica.	
Elaborado en io-GAS	52
Figura 18.Cut-off de 4.0 g/t establecido para el modelo numérico. Elaborado en	
Leapfrog Geo.....	53
Figura 19.Envoltentes generadas para la definición de dominios. Elaborado en Leapfrog	
Geo	53
Figura 20.Histogramas y estadísticas básicas para cada dominio después de capping y	
contraste con datos originales	54
Figura 21.Histograma y estadística básica para el dominio “Outside”, con media 0 y	
varianza 1. Elaborado en Leapfrog Geo	55
Figura 22.Histograma y estadística básica para el dominio “Inside”, con media 0 y	
varianza 1. Elaborado en Leapfrog Geo	55
Figura 23.Modelo espacial calculado para el dominio Inside. Elaborado en Leapfrog	
Geo.	56
Figura 24. Modelo espacial calculado para el dominio Outside. Elaborado en Leapfrog	
Geo.	57
Figura 25. Modelos de bloques generados por cada método de interpolación. Elaborado	
en Leapfrog Geo.....	58
Figura 26. Swathplot a lo largo del eje X para cada método de interpolación. Elaborado	
en Leapfrog Geo.....	60
Figura 27.Swathplot a lo largo del eje Y para cada método de interpolación. Elaborado	
en Leapfrog Geo.....	60

Figura 28. Varianza del Kriging obtenida en Interpolación con KO. Elaborado en Leapfrog Geo.....	61
Figura 29. Validación gráfica, con compósitos y modelo de bloques generado mediante KO. Elaborado en Leapfrog Geo.	62
Figura 30. Categorización del recurso, en función a la distancia de los compósitos. Elaborado en Leapfrog Geo.	63
Figura 31. Mapa de reporte de Recursos. Elaborado en ArcGIS Pro.....	65
Figura 32. Mapa de reporte de Reservas. Elaborado en ArcGIS Pro.....	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Referente normativo y legal.....	26
Tabla 2.Umbral calculado y número de outliers reemplazados en cada dominio	54
Tabla 3. Estadísticos básicos de los modelos de bloques generados por cada método de interpolación.....	59
Tabla 4. Reporte de Recursos	64
Tabla 5. Reporte de Reservas.	66

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

1.1. Descripción área problemática

El muestreo constituye un insumo fundamental dentro de todas las etapas de un proyecto minero, ya que con este se busca obtener valores de referencia de un elemento específico, para encontrar o delimitar un área determinada o de interés económico y tomar decisiones al respecto.

La empresa *Gran Colombia Gold*, ubicada en el municipio de Segovia, Antioquia, explota un depósito de oro-plata en vetas, y a diario recolecta gran cantidad de datos geoquímicos a través de los muestreos que se realizan de manera sistemática al interior de las minas y en los testigos de perforación durante las labores de logeo. Dichos muestreos arrojan como resultado valores de concentración del oro (g/ton). Esta información es utilizada por los diferentes departamentos de la empresa para la toma de decisiones.

1.2. Formulación del problema

Actualmente dicha información no tiene un tratamiento geoestadístico al interior de la empresa, ya que los reportes de recursos y reservas se realizan mediante ponderaciones que no contemplan la variación espacial de los datos. *SRK Consulting*, realiza un informe detallado de recursos y reservas para la empresa, que contempla dichas variaciones, sin embargo, suministra esta información sólo dos veces al año.

1.3. Justificación

Con base en lo enunciado anteriormente, se plantea utilizar los datos geoquímicos de la empresa con la ayuda de herramientas SIG y realizar un análisis geoestadístico interno para una actualización continua de los modelos de recursos y reservas de oro, y así reducir la variabilidad

en los indicadores de cumplimiento de producción, la incertidumbre en los diseños de planeación y contrastar o validar la información entregada por el consultor externo.

De lo previamente descrito, emerge la pregunta **¿Cómo realizar un cálculo y estimación de recursos y reservas en la empresa *Gran Colombia Gold* mediante un análisis geoestadístico y uso de herramientas SIG?**

2. OBJETIVOS

2.1.Objetivo General

Realizar el cálculo y estimación de recursos y reservas de oro en la mina *Providencia de Gran Colombia Gold-Segovia*, mediante un análisis geoestadístico y uso herramientas SIG.

2.2.Objetivo Específico

-Analizar la distribución espacial de la variable “contenido de oro (Au)”.

-Elaborar un modelo de recursos y reservas de oro (Au) para la mina *Providencia de Gran Colombia Gold-Segovia*.

3. ANTECEDENTES

En este apartado, son presentados los antecedentes del tema específico a desarrollar; éstos no son necesariamente tratados en un orden cronológico, ya que se pretende enfatizar en los avances realizados en los diferentes frentes de interés para esta investigación.

Teniendo en cuenta que la adecuada estimación y cálculo de recursos y reservas minerales, es un insumo fundamental dentro de un proyecto minero para la toma de decisiones que garanticen resultados efectivos en la compañía, se pretende generar un análisis geoestadístico en la mina *Providencia de Gran Colombia Gold-Segovia*, para el cálculo y estimación de recursos y reservas de oro, mediante la incorporación de un SIG y despliegue de toda la información.

3.1. Metodologías para el cálculo y estimación de recursos y reservas minerales

A continuación, son presentados algunos estudios en los que se exponen las distintas metodologías utilizadas para el cálculo y estimación de recursos y reservas minerales, que, aunque no todos integran la geoestadística con los Sistemas de Información Geográfica, si permiten una contextualización frente al interés de esta investigación.

Para la comprensión de la distribución y continuidad de un yacimiento mineral, es de suma importancia la geoestadística (SRK Consulting, s.f). Es a partir de los años sesenta, que surge el estudio de fenómenos con correlación espacial a través de métodos geoestadísticos (Hernández, 2017).

Según Sironvalle (2007), en la minería, la geoestadística se define como la aplicación de la teoría de “variables regionalizadas” en la estimación de recursos minerales, es decir, una función que representa la variabilidad en el espacio de una cierta magnitud relacionada a un fenómeno natural.

Cabe resaltar, que el muestreo y el modelo geológico son fundamentales en el cálculo de recursos y reservas minerales, y es donde se apoya la geoestadística, la cual permite desarrollar a través de un método de interpolación, un modelo de recursos y reservas minerales. Es el modelo geoestadístico o modelo de leyes, el que culmina la estimación de los recursos. (Novillo et al., 2014).

Asimismo, Buendía (2020) afirma que los métodos geoestadísticos, particularmente los variogramas y el kriging, no sólo son eficientes en la estimación de reservas minerales, sino también en la optimización de los procesos mineros para maximizar el beneficio económico y la extracción del mineral.

Como punto importante a considerar al momento de realizar la estimación y cálculo de recursos y reservas minerales, es el de los valores atípicos. Según Costa (2003) las aplicaciones mineras se caracterizan por presentar altos valores, más conocidos como valores atípicos, que afectan en gran medida la interpretación y el análisis estadístico. Un valor atípico puede ser crítico al momento de ejecutar un estudio, por eso es ideal realizar un tipo de procedimiento antes de proceder al cálculo y estimación de recursos y reservas minerales. El algoritmo del kriging (Rok), es usado para el análisis de datos exploratorio y para problemas relacionados con los valores atípicos en los datos de muestreo, este método es evaluado a través de su comparación con los modelos dados por el ordinary kriging, median indicator kriging, y lognormal kriging. El Rok proporciona mayor exactitud y precisión con respecto a los métodos que reducen significativamente el número de bloques mal clasificados. En las figuras 1 y 2 se pueden observar ejemplos de valores atípicos.

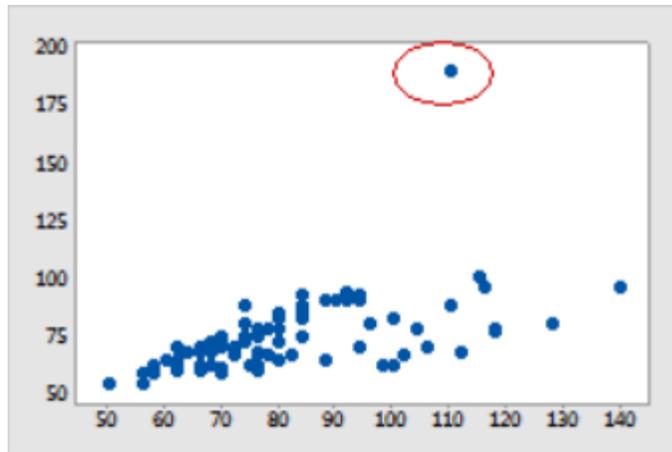


Figura 1. Gráfica de dispersión con un valor atípico, tomado de Minitab, (s.f.)

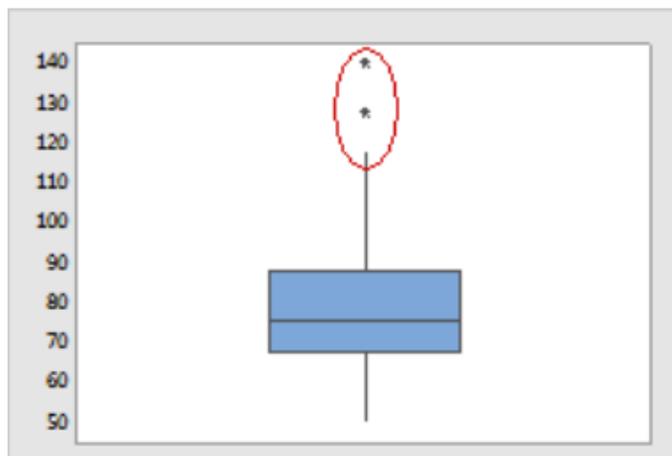


Figura 2. Gráfico de caja con dos valores atípicos tomado de Minitab, (s.f.)

Mencionando algunos estudios en los que se exponen las distintas metodologías utilizadas para el cálculo y estimación de recursos y reservas minerales, Gual et al. (1983), realizaron un estudio de las aplicaciones de técnicas geoestadísticas utilizadas para la evaluación y planificación de las reservas de cobre en las minas de *Camaqua*, pertenecientes a una empresa brasileña -*Cia Brasileira do Cobre (CBC)*, divididas en dos grupos, *Uruguai* y *Sao Luiz*, presentando diferentes patrones de mineralización y métodos de minería. La estimación y cálculo de recursos y reservas minerales de las minas *Camaqua*, fue apoyado por geoestadísticos y

desarrollado por el ingeniero francés G. Matheron a inicios de los sesenta, y su adecuado cálculo es evidencia de que la estadística permite suministrar metodologías para definir el modelo matemático que mejor se adapte al depósito, lo cual contribuye a una evaluación precisa de la reserva mineral, una adecuada planificación de la mina, etcétera; es por esto que la geoestadística tiene una gran aceptación en la industria.

Asimismo, Gual et al. (1983) afirman que los procesos de automatización son fundamentales para el desarrollo de un proyecto minero, y en conjunto con métodos geoestadísticos proporcionan gran cantidad de beneficios, como la reducción en el tiempo de realización del trabajo, sistematización de las etapas de campo, planificación y operaciones mineras, rápida actualización de los datos y los modelos y la conservación de los recursos minerales. Es por lo anterior, que se busca extender los procesos de automatización y geoestadística de datos en las minas.

Por otro lado, en Cuba, la estimación de reservas minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos se realizaba comúnmente a través de métodos tradicionales, los cuales según Cuador (2002), son poco apropiados para la complejidad de estos yacimientos, ya que no brindan descripciones detalladas de los parámetros geólogo-industriales, y tampoco consideran las características de correlación espacial y variabilidad, de modo que dan lugar a resultados del cálculo de recursos minerales poco exactos, afectando la explotación racional de los mismos. De manera que, Cuador (2002), teniendo en cuenta el caso de estudio del yacimiento *Punta Gorda*, integra a la caracterización de recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos, los métodos de estimación y simulación geoestadística, obteniendo una mayor precisión. Además, planteó soluciones científico-técnicas con una gran aplicación en la prospección geológica y la

explotación minera de los yacimientos, contribuyendo a la solución de problemas relacionados con la clasificación de reservas minerales, modelos geomatemáticos de yacimientos, entre otros.

Igualmente, en Cuba, se realizó la estimación de recursos en yacimientos de *Moa*, Cuba Oriental, a partir de dos bloques del yacimiento laterítico *Yagrumaje Norte*. Gentoiu y Acosta (2014), utilizaron métodos geoestadísticos, considerando más eficientes los multivariados, específicamente el kriging ordinario y el cokriging colocado. Este estudio lo complementaron con métodos geofísicos -Georradar (GPR)-, para aumentar la resolución de la información teniendo en cuenta una malla de pozos, lo cual fue posible por la geoestadística multivariada. De los bloques del yacimiento, tenían los datos de la explotación minera, que les permitió comparar y evaluar los resultados adquiridos, por lo que determinaron que el kriging ordinario arrojaba estimaciones más suavizadas de las variables, con respecto al cokriging colocado, que arrojaba distribuciones mucho más detalladas.

Otro ejemplo de dicha localidad, es el del yacimiento “*Hierro Mantua*”, ubicado al noreste de la provincia de Pinar del Río, conocido por las altas complejidades geológicas, que indican una gran heterogeneidad en los contenidos de Cu. Aun así, Carmona y Gil, (2019), lograron obtener la estimación del contenido de cobre (Cu) en el yacimiento, a partir de métodos geoestadísticos. Transformaron los datos logarítmicamente, con el fin de adquirir una mayor exactitud en la estimación de recursos, utilizaron semivariogramas para estudiar las estructuras definidas con anisotropía, entre otros elementos.

A propósito, Perez (2016) realizó la estimación de recursos de un yacimiento mineral de hierro, ubicado en un sector del municipio de Sativanorte, Boyacá. Para esto recolectó información bibliográfica de la zona, como cartografía y mapas geológicos, de manera que definió el planteamiento para la exploración del subsuelo. Obtuvo gran cantidad de información

que le permitió obtener una base de datos sólida, utilizó la geoestadística como metodología para la estimación mineral, más específicamente el “Kriging ordinario”, la cual suministró una categorización y estimación de los recursos de la zona en medidos, indicados e inferidos.

Otro caso es el de Jalloh et al. (2016), quienes llevaron a cabo una metodología llamada ANNMG, en la cual se integraron conexiones neuronales artificiales y geoestadística en la estimación y cálculo de recursos y reservas minerales, para la evaluación óptima de las mismas. Para esto se utilizaron los valores de contenido de oro obtenidos mediante el muestreo de pozos diamantinos exploratorios en un depósito de arena en Sierra Leona, para entrenar y validar un modelo usado e interpolar los valores para generar un modelo geológico de bloques 3D, que permitiera realizar un análisis comparativo entre el ANNMG y el Kriging, de lo cual se estableció que el ANNMG genera un menor sesgo al no operar bajo los supuestos resultantes de un análisis variográfico, sin embargo, no contempla depósitos con delimitaciones estructurales especiales como sistemas vetiformes o cuerpos fallados, además de que presenta diferencias mínimas con el resultado del Kriging, de modo que la metodología representa una herramienta poderosa para optimizar procesos de estimación.

Cuenca (2018), realizó el cálculo de recursos minerales de *VMS*, depósito polimetálico y con una mena enriquecida en sulfuros, el cual corresponde a la concesión Minera *Las Naves*, localizada en la provincia de Bolívar y en la unidad *Macuchi*. Para el cálculo de recursos minerales se consideraron métodos geofísicos, teniendo en cuenta cómpositos de dos metros y ejecución de geoestadística, que permitiera obtener leyes promedio.

Por otro lado, según Herrera y Jorge (2019), en Perú existen gran cantidad de medianas y grandes empresas mineras que a través del uso de programas realizan planificación minera, cálculos de reservas y leyes, modelamiento, sostenimiento, entre otras actividades. Como

ejemplo de éstos son, *Datamine*, *Gemcom-Gems*, *Vulcan 3D*, *Mine Sigth 3D*, *Leapfrog 3D*, *Geoestat*, *Isatis*, entre otros, los cuales optimizan los cálculos y brindan una adecuada gestión de los recursos minerales. Sin embargo, para su uso es necesaria una licencia, la cual quizás no sea un limitante para empresas medianas y grandes, pero sí para pequeñas empresas, universidades, etcétera, por el alto costo económico que representan. Pese a esto, existen programas de uso libre, es decir, que no requieren de una licencia, que, aun así, proporcionan las mismas funciones que los programas comerciales.

De manera que, Herrera y Jorge (2019), compararon los resultados de estimación de reservas minerales de la empresa *Volcan S.A.A.-Unidad Cerro de Pasco*, utilizando un programa comercial y un programa libre, con el fin de evaluar si eran significativamente parecidos los resultados, y así minimizar los gastos dentro de la compañía. A partir de esta comparación, concluyeron que los programas de uso libre presentan grandes ventajas como el bajo costo de implementación, renovación y capacitación, pero tienen una gran desventaja y es que sólo en su versión premium es incluido el módulo de geoestadística para la obtención del variograma y el cálculo de leyes. Como consecuencia de ello, los resultados obtenidos no fueron significativamente parecidos con respecto a los del programa comercial, sin embargo, el margen de error arrojado era tolerable; también consideraron, que el programa de uso libre no puede sustituir de manera eficiente el de uso comercial dentro de la compañía minera *Volcan*, pero, puede contribuir en gran medida al control de calidad en la estimación de reservas minerales.

Otro caso es el de Afeni et al. (2021), quienes realizaron el cálculo de las reservas (Ton/ley) del depósito de caliza *Oyo-Iwa*, Nigeria, a partir de métodos geométricos y geoestadísticos para un estudio comparativo de los resultados obtenidos. Esto con el fin de determinar cuál de los métodos de estimación era el más efectivo al momento de calcular las reservas en un proyecto de

extracción minera, ya que la inexistencia de evaluaciones comparativas, no permitía tener una claridad de cuál era el más óptimo, y en qué casos era ideal el uso de éstos según la necesidad. Afirman, que el método geométrico es un método sencillo, ahorra tiempo y dinero, ideal para las etapas iniciales de un proyecto y que la geoestadística es un método más complejo a usar en una etapa posterior cuando ya se tiene una población de datos mayor. Por lo tanto, consideran que, aunque el método geoestadístico presenta mayor precisión, el método a elegir dependerá de la fase del proyecto minero y en cuanto a cálculo de tonelaje, ambos serán efectivos en todas las etapas, pero en el caso de la estimación de la calidad, es más óptima la geoestadística, debido a la necesidad de precisión en este ítem y a su importancia en la factibilidad del proyecto.

Por su parte, Paíz (2021) propone una nueva metodología para categorizar los recursos minerales, mejorando la interpretación cualitativa, que asimismo aumenta la calidad de información para la toma de decisiones. Esta metodología, permite considerar estadísticas de correlación para la determinación de recursos inferidos que no se encuentran categorizados, y realizar la aproximación de los recursos medidos e indicados. Es aplicada a un caso sintético y a un caso de estudio de un depósito epitermal de oro, que según los resultados obtenidos, se considera con una alta factibilidad de aplicación.

3.2.La importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la geoestadística

A continuación, son presentados algunos trabajos en los que se integró la geoestadística con los Sistemas de Información Geográfica para el cálculo y estimación de recursos y reservas minerales. Asimismo, se expone la importancia de los SIG en los estudios geoestadísticos.

Tolentino (2019), considera que el integrar Sistemas de Información Geográfica con métodos geoestadísticos para la estimación de recursos y reservas de un proyecto minero, facilita el

estudio de la topografía, el tamaño, la forma, la orientación y la distribución de un depósito mineral, lo que a su vez contribuye a la toma de decisiones en cuanto al diseño y planificación en una compañía minera.

Centeno (2014), quien buscaba definir métodos para la optimización y generación de valor a yacimientos explotables a cielo abierto, teniendo en cuenta las diversas características que influyen en la planificación minera y enfocando la estimación de recursos minerales con métodos geoestadísticos desde el análisis exploratorio de datos, análisis variográfico y la estimación por kriging ordinario, afirmó que los procedimientos geoestadísticos son mucho más eficientes integrados con herramientas computacionales, más conocidas como “softwares mineros”.

Entrado en materia, en Canadá, la exploración de oro ha sido un foco importante de las empresas mineras en el último siglo, sin embargo, cada vez es más compleja la exploración por las posturas políticas, económicas, ambientales y geológicas. En consecuencia, fueron consideradas nuevas herramientas que permitieran el archivo, gestión, manipulación, integración y visualización de bases de datos, es decir, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales contribuyen en gran medida a la identificación de áreas favorables para la exploración minera, debido a que permiten integrar y combinar diversas capas de geodatos en mapas de prospectividad. (Harris et al., 2001).

Para realizar los mapas de prospectividad de oro del cinturón de *greenstone de Swayze*, Ontario, Canadá, fue utilizada la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica, en el que se consideraron datos geológicos, geoquímicos y geofísicos, utilizando estadísticas Bayesianas. En general para la realización de dichos mapas, los distintos métodos ofrecen ventajas y desventajas y como no está estipulada la manera correcta o incorrecta de realizarlo, en

este documento sólo se mostró un posible método para generarlo, utilizando un SIG. (Harris et al., 2001).

En el caso de Hua et al. (2013), ellos integraron geoestadística con Sistemas de Información Geográfica para el análisis de la distribución espacial del cobre en zona minera de *Lipu Copper* - mina ubicada en el centro-norte de Zhejiang-, y para la identificación de los suelos contaminados por metales pesados, en vista de que las tierras cultivables en China presentaban una grave contaminación como consecuencia de la industria minera. Dicha metodología, brindó un análisis con mayor precisión de la variación espacial del cobre en el área minera, mostrando un histograma con una distribución del cobre que se caracterizó por presentar una distribución normal, además de mapas de interpolación de Kriging que reflejaron una distribución espacial significativa de cobre, influenciada tanto por la contaminación como por factores geológicos.

Por su parte, Lee et al. (2014), realizaron mapas de potencial mineral con los datos del área mineralizada de Taebaeksan, Corea, utilizando la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en conjunto con varios modelos, lo cual permitió verificar la precisión de los depósitos epitermales de oro (Au) – plata (Ag), asumiendo una misma génesis para todos los depósitos. Para el mapeo del potencial mineral, son muchos los modelos propuestos, como los probabilísticos, estadísticos y de minería. Todos han sido utilizados para el cálculo de recursos minerales, sin embargo, han sido ejecutados de manera independiente, por lo que la diferencia de este estudio radica en combinar los resultados del potencial mineral adquiridos a partir de cuatro distintos modelos, para un mapeo más preciso. Esto permite construir un modelo a partir de observaciones de ocurrencias minerales considerando varios factores geológicos y características cuantitativas. Los SIG permiten un mejor análisis de datos geospaciales, por lo que fueron utilizados para la combinación y análisis de datos geocientíficos, es decir, geológicos,

geoquímicos y geofísicos. Para el estudio se combinaron mapas potenciales de Au-Ag, considerando la razón de verosimilitud, el peso de la evidencia, la regresión logística y los modelos de redes neuronales artificiales; se comparó y verificó el mapa de potencial mineral combinado, con cada mapa de potencial mineral en el área de interés. Finalmente, para el mapeo del potencial mineral se realizó una base de datos espacial, el procesamiento de la base de datos, la ejecución de cada modelo, la combinación de mapas de potencial mineral teniendo en cuenta la verosimilitud, la comparación y verificación de cada mapa de potencial mineral y mapa de potencial mineral combinado. Los resultados presentaron una alta precisión, por lo que el mapa de potencial mineral proporciona información útil para la estimación de recursos minerales (Lee et al.,2014).

Para la estimación y cálculo de recursos y reservas minerales de *Magnesite Incorporate Company*, una mina a cielo abierto de magnesita en Eskisehir-Turquía, Uyguchil y Konuk (2015) también integraron métodos geoestadísticos con la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para definir el método más adecuado. En este caso, el cokriging ordinario con tres variables fue el más apropiado y preciso para la estimación de la distribución y reserva de magnesita, el cual además, minimizó sustancialmente los gastos de producción en la inversión de la empresa minera, es decir, el uso de metodologías virtuales para la caracterización de depósitos minerales, para el cálculo de la calidad y cantidad mineral, y para modelar los métodos de producción, contribuyó significativamente a la reducción de los gastos de la explotación minera. El integrar Sistemas de Información Geográfica al análisis geoestadístico, para la estimación y cálculo de recursos y reservas minerales, proporcionó una información sustancialmente mejorada, ya que permitió obtener consultas espaciales e integrar diferentes tipos de datos como la topografía de la superficie con estimaciones de cokriging ordinarias.

Díaz et al. (2015), consideran que, para el cálculo de recursos y reservas minerales, es de suma importancia la rapidez y precisión, pero que cuando se realiza a partir de métodos geoestadísticos, normalmente con el kriging -el cual se encarga de definir un estimador lineal insesgado teniendo en cuenta los datos disponibles- éste es poco competente con el tiempo de ejecución, debido a la gran cantidad de datos y la dificultad de los cálculos. Como una alternativa viable para la solución al problema, Díaz et al. (2015) proponen la ejecución de técnicas de programación paralela al algoritmo de kriging ordinario, que permita agilizar la interpolación de los datos en la ejecución del método geoestadístico.

Igualmente González y Ortiz (2017), utilizaron Sistemas de Información Geográfica en conjunto con su módulo de herramientas de análisis espacial, para la ejecución de un estudio geoestadístico de la base de datos de la exploración minera del proyecto *San José* de la compañía minera *B2Gold*, para el estudio de la distribución de oro en las áreas muestreadas del proyecto, con el fin de identificar las zonas de mayor potencial minero y delimitar las áreas en donde aún no se había hecho un muestreo y que podían ser de interés para la empresa. Dicha metodología brindó una mayor confiabilidad con respecto a los estudios de estadística tradicional, que fue respaldado por el trabajo de campo, además de brindar una mayor precisión y un completo y mejor análisis de las zonas de interés. Obtuvieron un estudio exploratorio y estructural, a través de distintos histogramas, mapas, entre otros, con un mayor contenido de oro en las muestras de rocas que se localizaban al norte de la zona de estudio y hacia el SW de la misma.

4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL

NORMA	DESCRIPCIÓN	INVOLUCRADO
<p>NI 43-101</p>	<p>Es un grupo de reglas y pautas para informar y representar la información, relacionada con las propiedades minerales o zonas exploradas de compañías, que informan sus resultados en la bolsa de valores de Canadá.</p>	<p>Gran Colombia Gold Segovia se rige por los estándares de la NI 43-101 por tratarse de una empresa canadiense que cotiza en la bolsa de Toronto.</p>
<p>Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales CCRR</p>	<p>Es responsabilidad de la persona natural o de la compañía beneficiaria del título minero presentar un reporte público sobre Targets de Exploración, Resultados de Exploración, Recursos Minerales o Reservas Minerales.</p>	<p>Gran Colombia Gold Segovia</p>
<p>Contrato Individual de Trabajo GCGS</p>	<p>En el numeral 5 de las obligaciones del Empleado, se establece el compromiso de guardar absoluta reserva, salvo autorización expresa y escrita de la empresa de toda información de naturaleza privada.</p>	<p>Diego Arango como empleado de la compañía.</p>
<p>Normas Técnicas Colombianas - NTC, referentes a la información geográfica (IGAC)</p>	<p>La aplicación de los estándares geográficos, son encaminados a la mejora continua de los procesos de producción. Esta actividad se realiza de acuerdo con los lineamientos del Marco de Referencia Geoespacial, relacionados con información geográfica que habilita el Gobierno Digital del Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, que establece la adopción de las directrices de la ICDE para este tipo de datos.</p>	<p>Diego Arango y María Camila Rentería como autores de la tesis</p>

Tabla 1. Referente normativo y legal

5. GLOSARIO

-Compositación: Es una regularización de los datos, que pondera los valores de la variable de estudio en un intervalo determinado; reduce la cantidad de datos y por consiguiente el tiempo de cálculo o procesamiento. Se producen datos homogéneos y de más fácil interpretación, además se reducen las variaciones erráticas, producto de muestras con valores extremadamente altos. (Centro Provincial De Gestión Minero Agroempresarial Del Nordeste Antioqueño, 2020)

-Dominios: Denotan subclases que han sido planeadas específicamente en el diseño de la muestra. (Glosario términos estadísticos,2017)

-Geoestadística: Es la rama de la estadística especializada en el análisis y la modelización de la variabilidad espacial de fenómenos que tienen una componente espacial, es decir, de los cuales pueden obtenerse datos referidos a localizaciones específicas mediante coordenadas. (Geoinnova, 2019)

-Geoquímica: Es una especialidad de las ciencias naturales que sobre la base de la Geología y la Química, estudia de que está compuesto y como funciona nuestro planeta; determina la abundancia absoluta y relativa, y la distribución y migración de los elementos químicos entre las diferentes partes que conforman la Tierra (Hidrosfera, Atmósfera, Biosfera y Geósfera); trabaja en las transformaciones de los minerales y rocas, componentes de la corteza terrestre, con el propósito de establecer leyes o principios en las cuales se basa tal distribución. (¿Qué es la Geoquímica? | El geólogo geoquímico, 2019)

-Kriging: Es un método de inferencia espacial, el cual nos permite estimar los valores de una variable en lugares no muestreados, utilizando la información proporcionada por la muestra. El

método está planteado de manera que da el mejor estimador lineal no sesgado con una varianza mínima. (Porras, s. f.)

-Kriging Ordinario: Es el más general y más utilizado de los métodos kriging y es el predeterminado. Presupone que el valor medio constante es desconocido. Esa es una presuposición razonable, a menos de que haya una razón científica para rechazarla. (ESRI, s. f.)

-Logueo: Registro geológico del testigo de perforación, donde se describe litología, mineralización y otras características físicas del material que conforma la muestra del subsuelo. (Ministerio de Minas y energía, 2003)

-Mina: Excavación que tiene como propósito la explotación económica de un yacimiento mineral, la cual puede ser a cielo abierto, en superficie o subterránea. (Ministerio de Minas y energía, 2003).

-Mineralización: Acumulación de un mineral o de un metal a pequeña escala, que puede o no ser de interés económico o científico, puede ir desde centímetros (cm) hasta metros (m). (Ministerio de Minas y energía, 2003)

-Muestreo de canal: Este método consiste en cortar con la mayor exactitud posible, una ranura rectangular a través de toda la estructura mineralizada, para obtener una muestra de un determinado peso. (Centro Provincial De Gestión Minero Agroempresarial Del Nordeste Antioqueño, 2020)

-Pozo: En minería, se utilizan como labores de acceso desde la superficie en las minas subterráneas, pueden ser verticales o inclinados, con el objetivo de caracterizar el subsuelo en determinada zona de interés. (Ministerio de Minas y energía, 2003)

-Recurso: Los recursos geológicos -que se clasifican en recursos medidos, indicados e inferidos- son el resultado del proceso de exploración y son estimados usando modelos geocientíficos. Cuando estos recursos geológicos presentan un interés económico con una perspectiva razonable de una eventual extracción, se denominan recursos minerales. (Centro Provincial De Gestión Minero Agroempresarial Del Nordeste Antioqueño, 2020)

-Reserva: Cantidad (masa o volumen) de mineral susceptible de ser explotado, incluida la dilución, y a partir de la cual se pueden recuperar económicamente minerales valiosos o útiles bajo condiciones reales asumidas al momento de la cuantificación. (Ministerio de Minas y energía, 2003)

-SIG: Un Sistema de Información Geográfica, es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica. (García, 2021)

-Tenor: Concentración total de un mineral que puede ser económicamente extraída de un yacimiento. (Centro Provincial De Gestión Minero Agroempresarial Del Nordeste Antioqueño, 2020)

-Valor atípico: En estadística, un valor atípico es un punto de observación que se aleja de otras observaciones; es decir, algunos puntos de datos se encuentran más alejados de la media. La causa de un valor atípico puede ser la variabilidad de la medición, o puede indicar un error experimental; estos últimos a veces se excluyen del conjunto de datos. (Minitab, s. f.)

-Yacimiento: Es un depósito mineral cuyas condiciones de volumen, contenido de mineral, condiciones geomecánicas y de explotabilidad, lo hacen técnica y económicamente recuperable.

(Significado de Yacimiento, 2014)

6. REFERENTE TEÓRICO

La mina Providencia, se encuentra ubicada en el Distrito Minero Segovia–Remedios (DMSR), el cual se caracteriza por la cantidad de recursos minerales y su potencial para el desarrollo minero. Éste tiene registro de minería tecnificada desde hace más de 150 años, por lo que la minería artesanal en la región, se remonta a la época de la conquista española (Echeverry et al., 2009).

El yacimiento mineral, el cual es un sistema de vetas de cuarzo con sulfuros, se encuentra alojado en el *Batolito de Segovia*, la *Veta Providencia* es geológicamente continua en el rumbo, por cerca de 2 km y en cuanto a su buzamiento va desde 690 m hasta más de 1.3 km, presentando un espesor promedio de 0.9m. La veta se encuentra estructuralmente controlada por una serie de fallas que, de manera local, influyen en su división, desplazamiento y/o adelgazamiento. (SRK Consulting, 2013)

6.1.Generalidades

6.1.1. Localización

El DMSR se ubica a 180 km de la ciudad de Medellín, en la subregión del nordeste antioqueño (Figura 3).

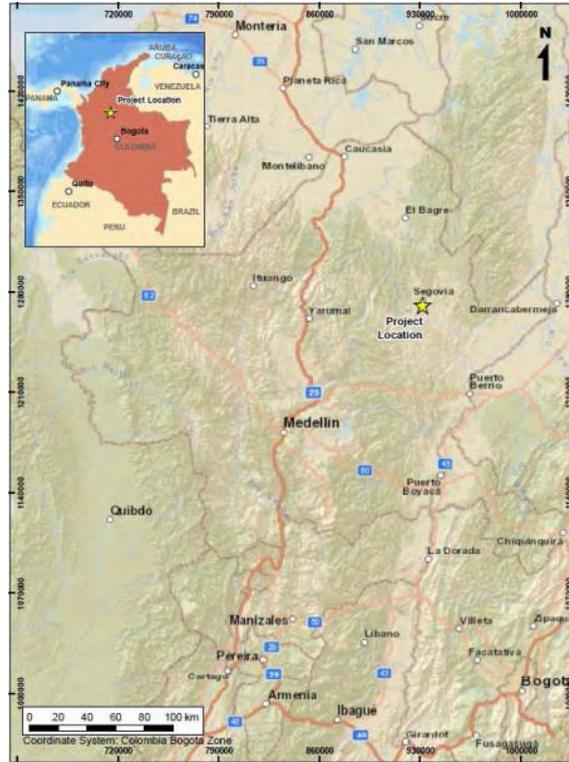


Figura 3. Ubicación del DMSR. Tomado de SRK Consulting, 2013

6.1.2. Vías de acceso

Segovia se encuentra a 130 km al NE de Medellín, a 74° 42' W y 7° 04' N, con un acceso por carretera pavimentada de 225 km. Se conecta también con Zaragoza, a través de una carretera de 61 km y a Caucaasia con otros 120 km que conectan con vías que conducen a los puertos atlánticos de Colombia. En cuanto al acceso aéreo, se realiza en vuelos comerciales de aproximadamente 30 minutos desde Medellín hasta Otú, a 15 km al sur de Segovia. (SRK Consulting, 2013)

6.1.3. Economía

La actividad económica se concentra principalmente en la exploración y explotación de material aurífero, ya que el municipio produce el 39.4% del total del oro de la región y el 6.66% de la producción nacional. El comercio se desarrolla principalmente en el área urbana y gira en

torno a la industria extractiva del material aurífero con los entables, las compras de oro, la provisión de víveres, la venta de licores, y almacenes de misceláneas. La ganadería es incipiente y está concentrada en pocas fincas con un promedio de 50 cabezas de ganado por parcela. Su productividad es baja debido a la dificultad de producir pastos saludables, y el medio ambiente no es propicio para desarrollar la ganadería extensiva de alta productividad en carne o en leche. La agricultura se caracteriza principalmente porque carece de técnicas de producción y dentro de la cual se destacan productos como: la yuca, el plátano, el maíz y el arroz. Esta está dedicada básicamente a la producción de alimentos para el consumo interno, y con deficiencias en materia de productividad y comercialización (Alcaldía Municipal de Segovia, 2018).

6.1.4. Clima

Segovia se encuentra dentro de una zona caliente ($>24^{\circ}\text{C}$) donde el clima es tropical y húmedo, con una precipitación anual de aproximadamente 2.670 mm. Tiene una temperatura promedio de 25°C y una humedad relativa de 70%. (SRK Consulting, 2013)

6.1.5. Fisiografía

El DMSR se ubica en las estribaciones de la parte nordeste de la cordillera central de los Andes colombianos. La topografía corresponde a una meseta baja o una superficie erosiva entre los 600 y 800 msnm y que es cortada por valles con relieve menor a 250 m con pendientes entre 20° y 40° . El patrón de drenaje es dendrítico (SRK Consulting, 2013).

6.1.6. Geología

6.1.6.1. Geología Regional

El contexto geológico del DMSR puede dividirse en dos sectores; oriental y occidental, separados por la falla *Otú*, la cual regionalmente conforma el sistema de fallas *Otú-Pericos*, que

es considerado como el límite que separa los terrenos *Chibcha* que comprende el sector oriental y el *Tahamí* que comprende el terreno occidental (Restrepo y Toussaint, 1988).

El sector oriental está conformado por gneises cuarzosos, mármoles y anfibolitas de edad precámbrica, rocas intruidas por el *Batolito de Segovia*, de edad jurásica (Ordóñez et al., 1999). el sector occidental está representado por una secuencia de gneises feldespáticos, aluminicos y cuarzosos, mármoles y anfibolitas, de edad desconocida, rocas que están intruidas por stocks ácidos e intermedios no diferenciados. El dominio estructural está definido por la zona de falla *Otú-Pericos* (ZFOP). Se ha establecido una componente sinestrolateral dominante para esta estructura conformada por patrones de fracturamiento con tendencia regional N-S a N10W, en la region del DMSR, e inflexiones locales N30W asociadas a los sectores económicamente más atractivos del distrito. Zonas discretas de deformación dúctil, construidas por rocas graníticas altamente cizalladas, anfibolitas y mármoles, son observadas a lo largo de la ZFOP, con un componente tectónico similar (Álvarez et al., 2007).

6.1.6.2. Geología Local

-Rocas Intrusivas.

Dioritas a cuarzodioritas afloran en toda la zona estudiada preferencialmente en la porción occidental, en cercanías a Segovia y Remedios, en parte de las cuencas de las quebradas “*El Aporriao*”, “*Juan Bran*” y “*El Diamante*”, en menor proporción se encuentran cuerpos gabroícos de menor tamaño, dentro de las variaciones de esta unidad intrusiva. Las zonas donde aflora esta unidad se caracterizan por la presencia de roca fresca, saprolito y suelos arenoarcillosos característicos de este cuerpo. Esta unidad está compuesta por cuarzo, feldespato, hornblenda y algo de biotita y se extiende sobre un área mucho mayor y continua, que aflora hacia el suroccidente de la zona, observándose en la margen izquierda de la vía que comunica la

vereda “*El Río*” con Segovia. Textualmente las dioritas varían de masivas a gnéissicas en zonas de falla, estas últimas caracterizadas por una tonalidad verdosa, muy cizalladas dando la apariencia de esquistos verdes por el alto grado de cizallamiento (González et al, 2010).

-Depósitos Cuaternarios.

En esta unidad se enmarcan los amplios depósitos aluviales que conforman terrazas y llanuras de inundación de los ríos “*Bagre*” y “*Bagrecito*”. Estos depósitos están conformados por bloques y gravas embebidos en una matriz areno-limosa. Igualmente, hacen parte de los depósitos aluviales localizados en la cuenca de la quebrada “*El Aporriao*” (González et al, 2010).

Para realizar el cálculo y estimación de recursos y reservas en la mina *Providencia* de *Gran Colombia Gold*-Segovia, se tiene en cuenta un análisis geoestadístico con herramientas SIG:

6.2. Geoestadística

Según Emery (2011), se refiere al estudio de los fenómenos que se extienden en el espacio y son continuos en el mismo, que, a diferencia de la estadística clásica, la geoestadística pretende incorporar en el análisis, las dependencias o relaciones existentes entre los datos presentes, teniendo en cuenta su ubicación geográfica.

Esta investigación desarrolla entonces, una aproximación matemática al fenómeno “contenido de oro (Au)” en la zona de estudio, a través de herramientas geoestadísticas.

Para la estimación de recursos y reservas minerales, a partir de métodos geoestadísticos, son considerados los siguientes conceptos:

6.2.1. Composición

Las longitudes en los intervalos de muestreo, utilizados tanto para canaletas como para pozos de perforación, no corresponden a los intervalos de trabajo utilizados en la fase del cálculo y estimación de recursos y reservas. Los intervalos de muestreo son más pequeños, debido a que su objetivo es revelar la variabilidad espacial de la variable de interés. Se hace necesario entonces, realizar una combinación de esos intervalos de muestreo en intervalos de regular longitud que no coinciden con la longitud original de las muestras; El valor de oro (Au) en el nuevo intervalo compuesto, se obtiene calculando el promedio ponderado entre las longitudes de las muestras que contribuyen al compuesto (Figura 4).

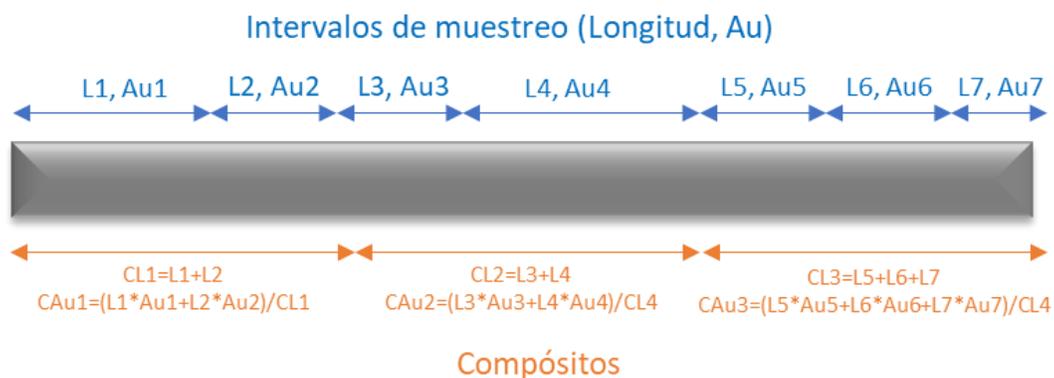


Figura 4. Proceso de composición de sondajes. Elaborado en PowerPoint

La composición se realiza con el objetivo de conseguir valores representativos de una unidad litológica o mineralización, que puedan ser usadas mediante funciones de interpolación para estimar el comportamiento de la variable de interés, reduciendo los datos, haciéndolos más homogéneos y reduciendo variaciones erráticas.

6.2.2. Análisis explotario de datos (EDA)

Antes de utilizar los métodos geoestadísticos propiamente dichos, se debe realizar un análisis exploratorio, el cual consiste en utilizar herramientas simples de estadística, con el

objetivo de analizar la cantidad, calidad y ubicación de los datos, además de definir zonas o subzonas de interés, donde se aprecien anomalías o comportamientos especiales del fenómeno estudiado, y anticipar posibles problemas al momento de la estimación como presencia de valores abruptos (Emery, 2011).

El EDA, consiste en realizar un despliegue de datos, el cálculo de histogramas y pie charts para conocer la distribución de los datos, así como las medidas de posición (mínimo, máximo, media, mediana) y de dispersión (desviación estándar, varianza, coeficiente de variación).

Adicionalmente, se realizan box plots, para representar los rangos intercuartiles de los datos, nubes direccionales para observar cómo se comporta la variable de manera espacial a lo largo de cada uno de los ejes y los gráficos de probabilidad, que buscan comparar la distribución de los datos disponibles con una distribución normal.

6.2.3. Caping

Es el manejo que se realiza sobre los valores extremos, que permite no incurrir en problemas de sobre o subestimación. Dicho manejo de altas leyes o grados se realiza definiendo valores outliers, lo cual se ejecuta en la variable, en este caso oro (Au), aplicando un caping tradicional, dicho de otra manera, todas las muestras cuyo valor sea mayor al umbral definido se capean (se llevan al valor del umbral para la estimación). El umbral para capeo está definido por:

$$\text{Umbral} = m + 2\sigma$$

Donde m = media y σ = desviación estándar. (Emery, 2011)

6.2.4. Análisis Estructural

El análisis estructural permite calcular la correlación espacial existente entre los datos, la elaboración de los semivariogramas y el ajuste del modelo teórico experimental. La fórmula de la semivarianza viene dada por:

$$\gamma(h) = \frac{\sum(Z(x+h) - Z(x))^2}{2n}$$

Siendo $Z(x)$ el contenido de oro (Au) que tiene una muestra compositada en determinado lugar del espacio, asimismo $Z(x+h)$ representa el valor de contenido de oro de otra muestra compositada que se ubica a una distancia h y n representa el número de parejas de datos que se encuentran separados por esa distancia.

Es fundamental considerar tres parámetros para el ajuste del Semivariograma: **rango**, **meseta** y “**el efecto pepita**” (Gonzales y Ortiz, 2017). La figura 5 muestra los principales elementos del Semivariograma.

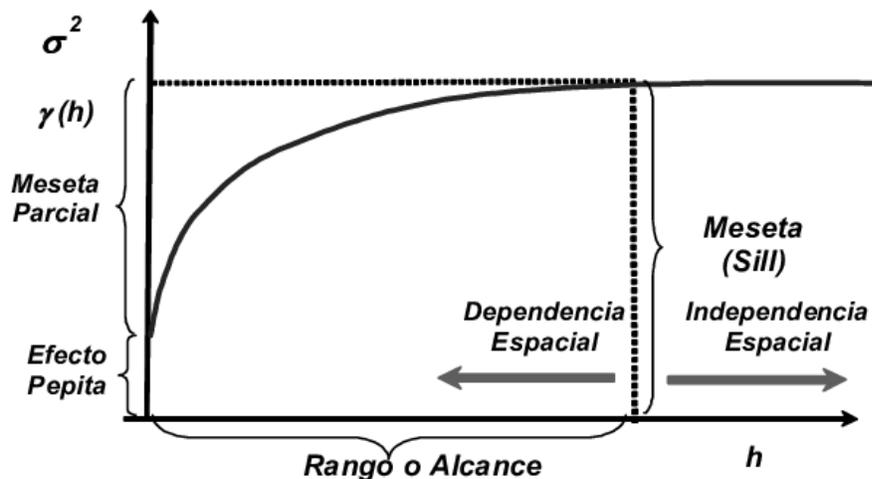


Figura 5. Principales elementos del Semivariograma. Tomado de Betancur, et al. (2007)

6.2.5. Interpolación

Consiste en métodos de inferencia espacial, para asignar valores de la variable de estudio en zonas donde no se tiene muestreo, a partir de los otros datos sobre los que sí se conoce el valor de la variable a través de muestras, pero asignando pesos más altos a aquellos datos que se encuentran más cerca de cada valor a estimar (Gonzales y Ortiz, 2017).

6.2.6. Modelo de Bloques

La generación de un modelo de bloques consiste en discretizar la porción del modelo geológico que tiene un interés económico en paralelepípedos o bloques regulares (Lagos, 2011).

Contiene información importante acerca de:

- La ubicación espacial del centroide de cada bloque (coordenadas x, y, z).
- El volumen de material susceptible de ser minado.
- El tenor, la concentración de oro (Au) presente en cada bloque (g/t)

Un modelo de bloques, constituye una herramienta fundamental para la planeación y la optimización de la explotación minera. La figura 6 se observa un ejemplo del mismo.

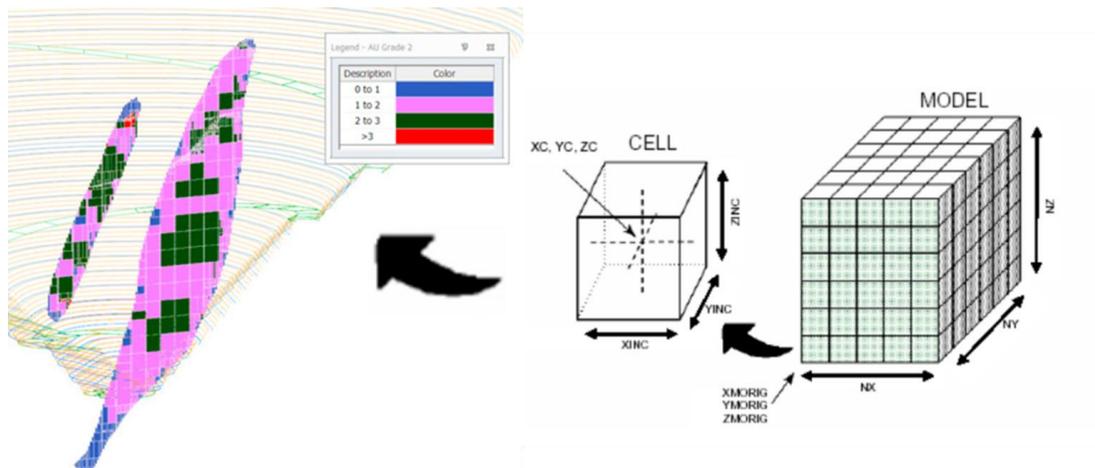


Figura 6. Concepto y ejemplo de un modelo de bloques. Tomado de Choque, (2020)

7. METODOLOGÍA

7.1. Tipo de trabajo

Este trabajo propone el uso de Sistemas de Información Geográfica y sus módulos de análisis espacial, como herramientas para el análisis geoestadístico de la información de una base de datos, que dé lugar a modelos de reservas en la mina *Providencia* de Gran Colombia Gold Segovia.

Específicamente, el proyecto involucra el uso de los programas PostgreSQL, ArcGIS y Leapfrog, para la creación del repositorio de la base de datos, mapas de 2D y 3D, modelos de veta y modelos de bloques.

7.2. Procedimiento

El procedimiento se llevó a cabo en las siguientes fases:

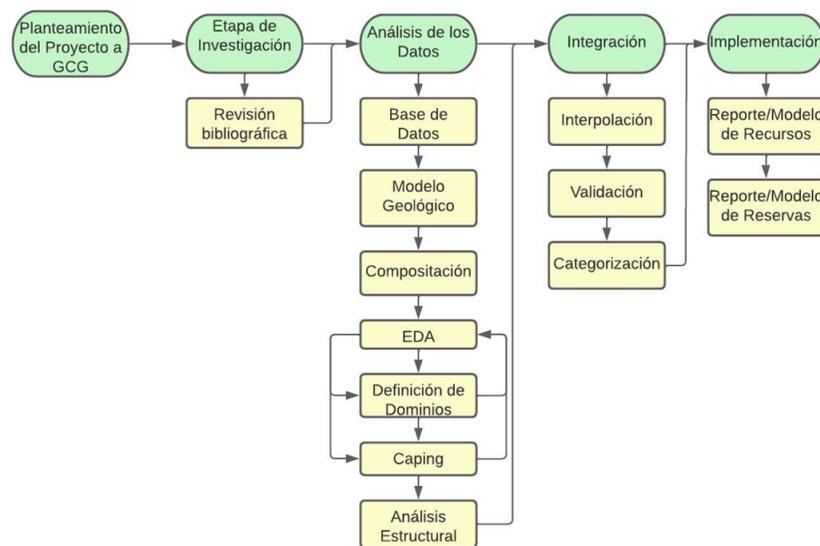


Figura 7. Flujograma de metodología. Elaborado en PowerPoint

7.2.1. Planteamiento del proyecto

Se socializa el alcance y los objetivos del proyecto con la compañía *Gran Colombia Gold* Segovia, para lograr acuerdos de confidencialidad y los permisos necesarios para el uso de la información, que permitan un desarrollo óptimo del proyecto.

7.2.2. Etapa de investigación

Se realiza la búsqueda y revisión de fuentes bibliográficas, trabajos e investigaciones a fines al proyecto, que sirvan como referencia para la ejecución y mejoramiento de las ideas iniciales del proyecto.

7.2.3. Análisis geoestadístico de los datos

Para el análisis geoestadístico de los datos, se consideró lo siguiente:

-Base de datos: Creación de base de datos –georreferenciados-, con resultados de laboratorio para 17700 canaletas y 72 pozos de perforación diamantina, siendo la variable de estudio “Contenido de Oro” (Au).

-Modelo geológico (wireframes): Generación de modelos de veta ajustados en el software *Leapfrog Geo*, a partir de la ubicación espacial de los datos y los sólidos de referencia, en los cuales se inscribirá la estimación de recursos y cálculo de reservas.

-Compositación: Regularización de la longitud del muestreo, para homogeneizar los datos y disminuir las variaciones erráticas.

-Análisis exploratorio de Datos (EDA): Análisis estadístico detallado para determinar las medidas de posición, dispersión y forma de la variable objeto de estudio (Media, Moda, Mediana, Desviación Estándar, Curtosis, etc) y establecer el tipo de distribución estadística al cual se ajustan.

-Definición de Dominios: Se generan envolventes que separan las leyes altas de las bajas en la veta, con el fin de evitar el “suavizamiento” dado por la combinación de datos con un amplio rango de valores en un mismo dominio. Las leyes altas son contenidas en el dominio “Inside” a la vez que las leyes bajas se encuentran en el dominio “Outside”.

-Capping: Análisis de valores extremos, para evitar sobre o subestimación. El manejo de altas leyes o grados se realiza definiendo valores *outlier*, teniendo en cuenta la variable ley y aplicando un capping tradicional, es decir, todas las muestras mayores al umbral definido se llevan al valor del umbral para la estimación.

-Análisis estructural: Cálculo de modelos de semivariogramas teóricos ajustados a modelos matemáticos, para representar la correlación espacial entre los datos, con la ayuda del módulo *Edge* del software *Leapfrog*.

7.2.4. Integración de un SIG

Para la integración de un Sistema de Información Geográfica se tuvo en cuenta lo siguiente:

-Interpolación: A partir de los parámetros determinados durante los análisis exploratorios de datos (EDA) y los análisis estructurales realizados a cada uno de los dominios, se interpola el contenido de oro (Au) con el método seleccionado (Kriging, IDW, etc). Asimismo, se generan superficies de predicción, mapas y modelos de bloques para las variables contenido de oro (Au) en *ArcGIS* y *Leapfrog Geo*.

Cabe mencionar, que los métodos de interpolación se dividen en dos principales grupos: ***Determinísticos*** y ***Estadísticos Geográficos***. El método ***Determinístico*** consiste en la generación de superficies mediante puntos conocidos, a partir de los cuales se realiza la estimación con base a relaciones espaciales, las cuales son dadas por la extensión de la similitud (influencia de la

muestra dependiente de la distancia). Por su parte, los métodos de interpolación geoestadísticos como el Kriging utilizan las propiedades estadísticas de la muestra, cuantificando la dependencia espacial de los datos conocidos y considerando la ubicación espacial de estos en relación con el lugar de estimación. (Esri, s. f.)

-Validación del modelo: Validación gráfica y estadística de los modelos de bloques, para verificar una buena correspondencia entre los valores de compósitos utilizados y las zonas interpoladas a su alrededor.

-Categorización del recurso: Clasificación de los recursos según la certeza que se pueda tener sobre los mismos, teniendo en cuenta la distancia radial de cada punto no muestreado, siendo la certidumbre inversamente proporcional a la distancia.

7.2.5. Implementación del sistema

Clasificación y estructuración de la información generada, para su migración a un Sistema de Información Geográfica, de modo que sirva como una plataforma para el despliegue de información y una herramienta de consulta con actualización constante y dinámica con la entrada posterior de nuevos datos de exploración, lo cual contribuye a la toma de decisiones en pro al desarrollo y el planeamiento del proyecto minero.

8. RESULTADOS

Este apartado presenta los resultados del proceso para el cálculo de reservas y estimación de recursos de oro en la mina *Providencia* de Gran Colombia Gold:

8.1. Base de datos

Se obtiene un modelo Entidad-Relación en *PostgreSQL* (figura 8), que da lugar a una estructuración ordenada de los datos en una base de datos, lo cual permite la validación de la información, depuración de datos nulos o erróneos, realizar consultas específicas mediante lenguaje SQL y establecer conexiones directas con otros programas para el despliegue y procesamiento de los datos. En este caso, se utilizó información georreferenciada de 17700 canaletas y 72 pozos de perforación diamantina que corresponden a un sector de la mina *Providencia*. Cabe mencionar, que el modelo Entidad –Relación permite que esta información sea utilizada también, para otras zonas y otras minas de la compañía.

En la figura 8, se observa cada una de las entidades utilizadas y su relación. Estas entidades contienen:

- Sondaje:** Los tipos de sondaje en el campo Tape.
- Collar:** La información de la ubicación espacial de cada punto inicial de los sondajes y la longitud total del mismo.
- Survey:** La dirección horizontal (Azimuth) e inclinación (Dip) del sondaje en diferentes profundidades (Depth)
- Assay:** Los resultados de oro para los tramos muestreados.
- Lithosondaje:** Las distintas litologías presentadas en los tramos del sondaje.

-**Litho**: Las distintas litologías o tipos de roca presentes en el yacimiento.

-**Mina y Municipio**: Los registros de la mina y el municipio en el que tiene lugar cada uno de los sondajes.

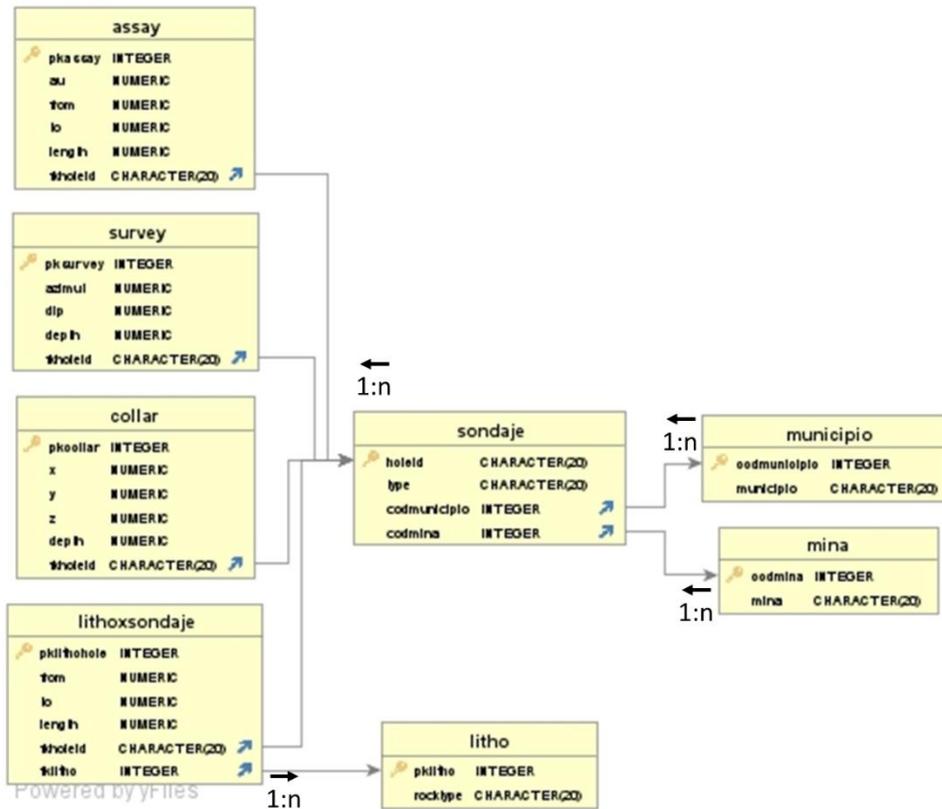


Figura 8. Modelo Entidad-Relación. Elaborado en PostgreSQL

8.2. Modelo Geológico

A partir de la ubicación espacial de los datos y la topografía de las labores mineras, se obtienen modelos de veta ajustados en *Leapfrog Geo* de acuerdo a su algoritmo de modelamiento implícito, lo cual da lugar a la generación automática de los sólidos una vez definidos los puntos de control y el borde o *boundary* que los limita.

La geometría final de las vetas se valida visualmente, verificando que se ajusten bien a la topografía y a las dimensiones de los canales y tramos de perforaciones utilizadas para su

generación; asimismo, se valida que su orientación coincida con los datos estructurales recolectados por el geólogo de campo, en este caso un rumbo Este-Oeste, con buzamiento hacia el Norte, delimitado por un sistema de fallas en sentido Sureste-Noroeste.

De manera coincidente con las convenciones internas de la empresa y para efectos de la estimación, los sólidos son nombrados **Bloque 1020** –mayor tamaño- y **Bloque 1030** –menor tamaño-.

La figura 9, muestra los sólidos obtenidos, dentro de los cuales, se circunscribe la estimación de recursos y cálculo de reservas.

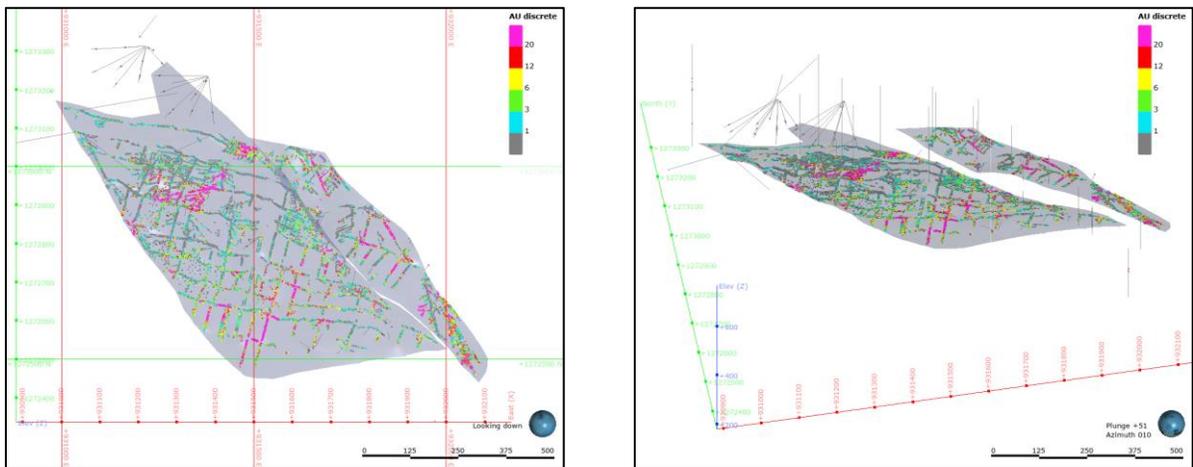


Figura 9. Modelo de veta en la mina Providencia, vista en planta y vista isométrica respectivamente. Elaborado en Leapfrog Geo

8.3.Composición

Para la composición, fue fundamental considerar las siguientes características del yacimiento y del área de estudio:

-El depósito es de tipo vertiforme, es decir, su mineralización de interés económico se restringe o delimita por el sólido de la veta, por lo cual no es necesario compositar muestras por fuera de ese volumen y el proceso se realiza de manera exclusiva dentro del mismo.

-La veta *Providencia* tiene un espesor variable en el espacio, lo cual implica que los compósitos no presenten una longitud regular, si no igual al espesor de la veta.

-En el área de estudio, la veta es cortada por una falla, que da lugar a dos bloques separados, por lo que se realiza la compositación por separado dentro de cada uno de los sólidos.

Teniendo en cuenta las características mencionadas anteriormente, a través de *Leapfrog* se realizaron filtros espaciales para considerar solamente las muestras contenidas dentro de los bloques de interés, en este caso el 1020 y 1030. Posteriormente, con la herramienta “*Numeric Composite*” se da lugar al geoprocesamiento, el cual permitió compositar las muestras a partir del ancho de la veta y obtener valores de oro (Au) ponderados. En la figura 10, se puede observar los datos compositados, generados dentro de los bloques 1020 y 1030.

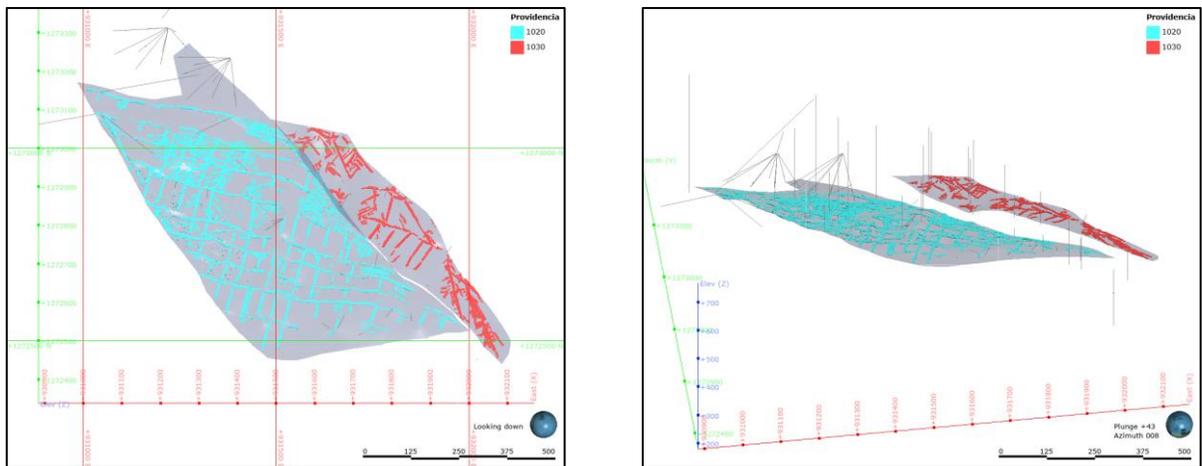


Figura 10. Modelos de veta en la mina Providencia, vista en planta y vista isométrica respectivamente. Elaborado en Leapfrog Geo.

8.4. Análisis exploratorio de datos (EDA)

Es realizado un análisis general del comportamiento de la variable oro (Au) en los datos compositados, a través de herramientas estadísticas básicas.

-Despliegue de datos: Los sólidos presentan una población densa de datos, lo cual es consecuencia del muestreo sistemático dado a lo largo de las labores mineras, sin embargo, en la parte Norte del modelo, se tienen algunos datos muy espaciados con valores de Au, lo cual puede indicar un cierre de la mineralización en el sector. También en la parte Sureste del sólido, se tiene un pozo aislado con un resultado de 12 a 20 g/t Au, que, aunque puede significar una continuidad de los valores económicos, en dicho sector debe considerarse la falta de información alrededor, para no cometer errores de sobreestimación. En la figura 11, se observa una dirección preferencial, en la que se concentran las altas leyes (Oreshoot) y se evidencian dos líneas con una tendencia aproximada de N45E.

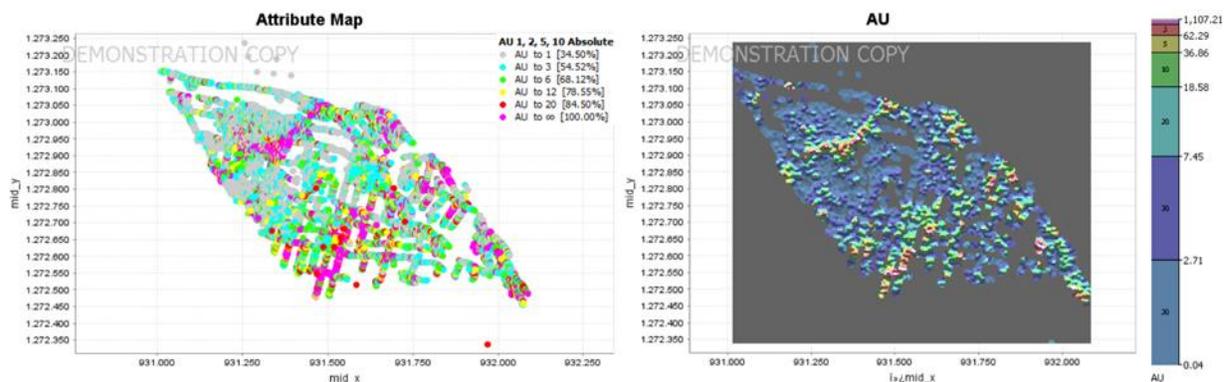


Figura 11. Dirección preferencial, en la que se concentran las altas leyes (Oreshoot) y se evidencian dos líneas con tendencia aproximada de N45E. Elaborado en io-GAS

-Histogramas y estadísticas básicas: Se observa que, en la zona de interés, la mayoría de los datos presentan una concentración hacia la izquierda de la gráfica, lo cual indica un comportamiento típico de yacimientos de oro en vetas, que al generar los histogramas para los datos capeados da lugar a una reducción considerable en la heterogeneidad de los valores. (figura 12)

Al realizar una transformación logarítmica, se puede apreciar claramente una “cola” hacia la derecha, es decir, una gran variación de los valores hacia la derecha por encima de la media. En ambos casos, se tienen valores altos para la desviación estándar, esto es, un coeficiente de variación >30%, lo que permite definir los datos como “heterogéneos”.

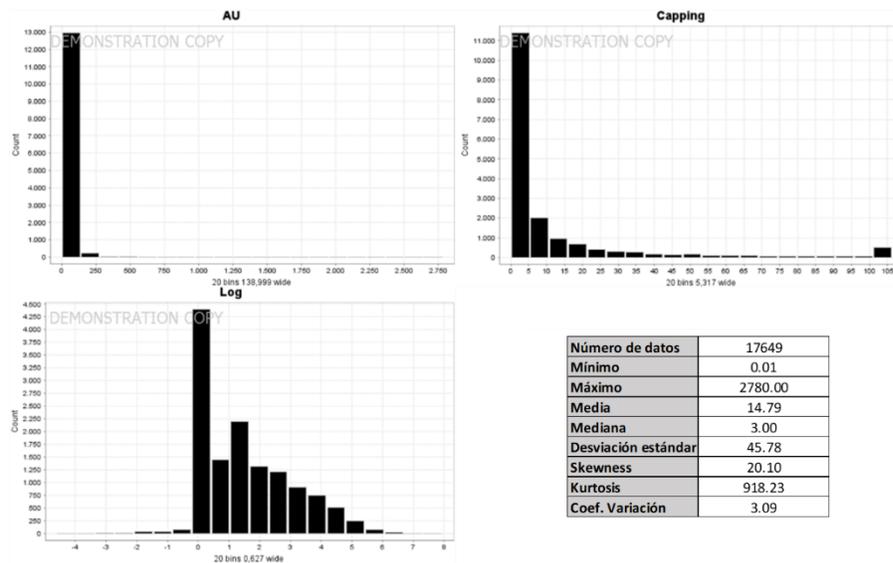


Figura 12. Histogramas y estadística básica

-Diagramas de caja: Se obtienen los diagramas de caja y bigotes para cada una de las categorías de la leyenda interna de tenores de la compañía, teniendo en cuenta qué tanto se alejan

los datos de sus respectivas medias. En la figura 13, se puede apreciar que la mayor dispersión de los datos se presenta en los valores altos.

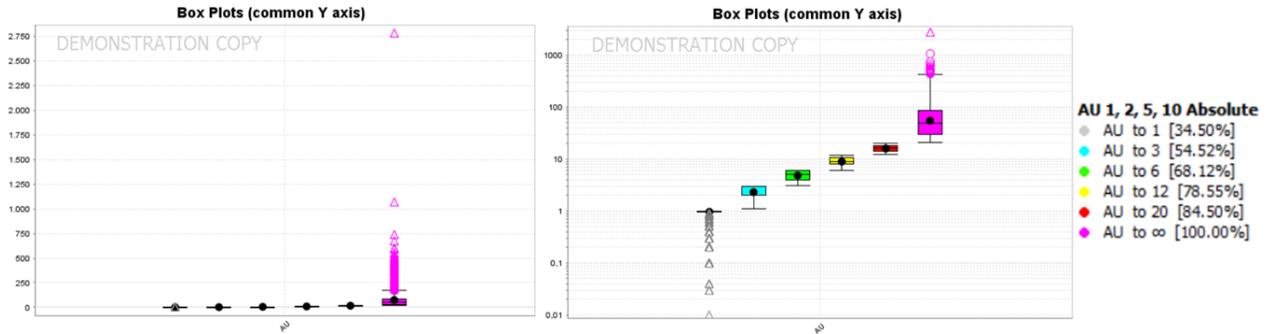


Figura 13. Diagrama de caja y Diagrama de caja en escala logarítmica. Elaborado en io-GAS

-Pie Chart: En la figura 14, se logra apreciar la distribución porcentual de los tenores dentro de la zona de interés, según las categorías de la leyenda interna de tenores de la compañía.

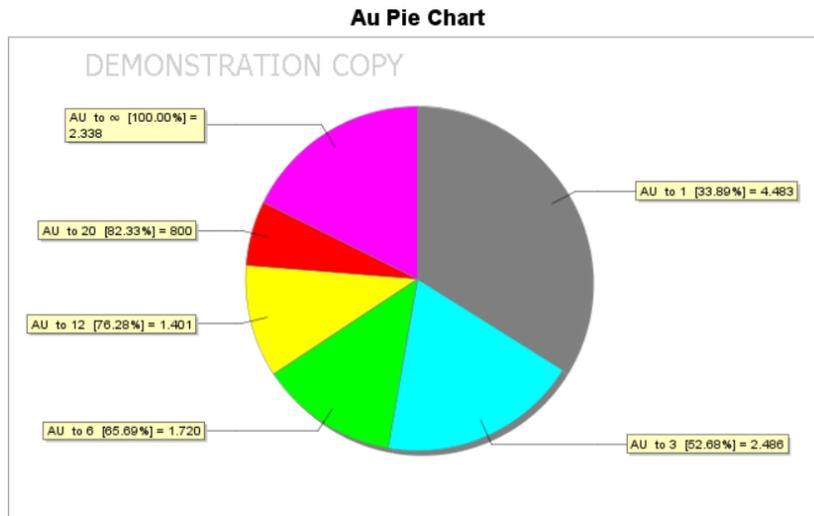


Figura 14. Pie Chart. Elaborado en io-GAS

-Nube direccional: Se observa la distribución de los valores a medida que se desplaza por cada uno de los ejes coordenados. Se logra confirmar el comportamiento heterogéneo de los

valores altos, sin embargo, en la parte Norte, se observan dos considerables picos (figura 15), lo que a su vez valida la presencia de dos zonas con altos valores dentro del sólido.

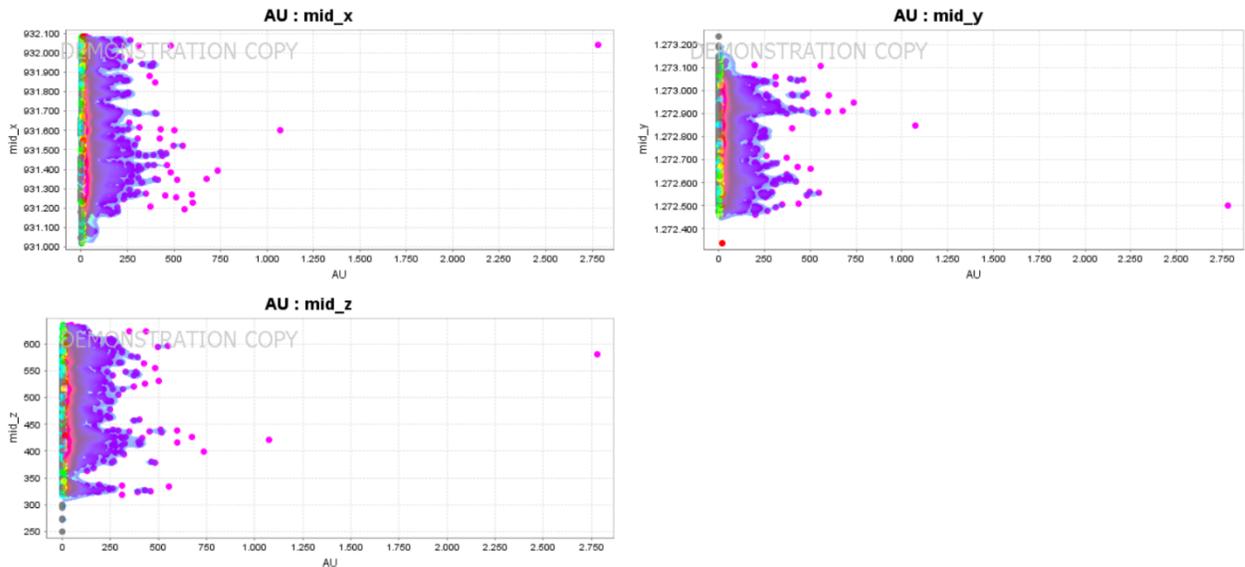


Figura 15. Nube direccional. Elaborado en io-GAS

-Gráficos de probabilidad: En la figura 16, se observa la comparación de la distribución de los datos con una distribución normal de referencia, lo cual permitió determinar si presentaba un comportamiento normal. En la figura 17, se realiza la misma comparación, pero considerando los datos transformados a través de una función logarítmica. Pese a que el segundo caso se aproxima mucho más, en ambos casos, no se cumple con la condición de normalidad para los datos.

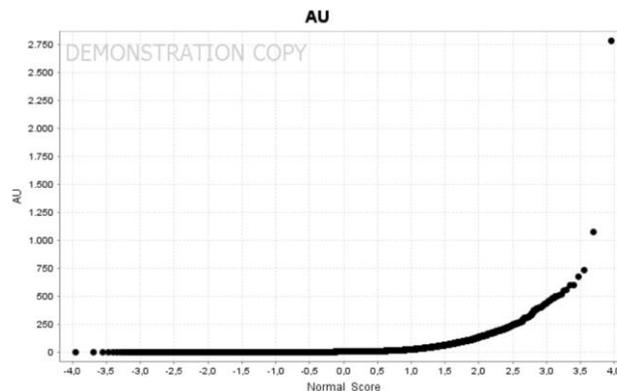


Figura 16. Gráfico de probabilidad de datos originales. Elaborado en io-GAS

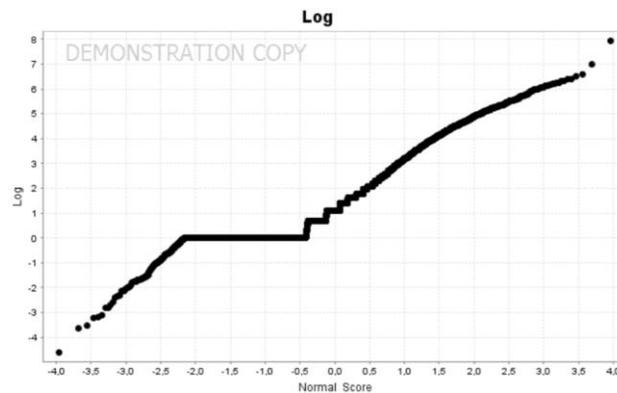


Figura 17. Gráfico de probabilidad de datos transformados con función logarítmica. Elaborado en io-GAS

8.5. Definición de dominios

Con la ayuda de la herramienta “RBF Interpolant” se generó un modelo numérico que consiste en una función de base radial con el objetivo de separar las poblaciones de alto y bajo tenor, a través de envolventes dentro del volumen que circunscribe el sólido o modelo de veta. Se utilizó un cut-off de 4,0 g/t. Lo anterior permitió realizar un tratamiento diferente a los compósitos, dentro de cada envolvente, para una interpolación más precisa al tener rangos de valores más acotados y unas poblaciones más homogéneas (figura 18 y 19). El dominio que comprende los datos con valores altos, fue denominado “Inside” y fue representado con color rojo mientras que el dominio en el que se encuentran los valores bajos se denominó “Outside” y fue representado con color azul.

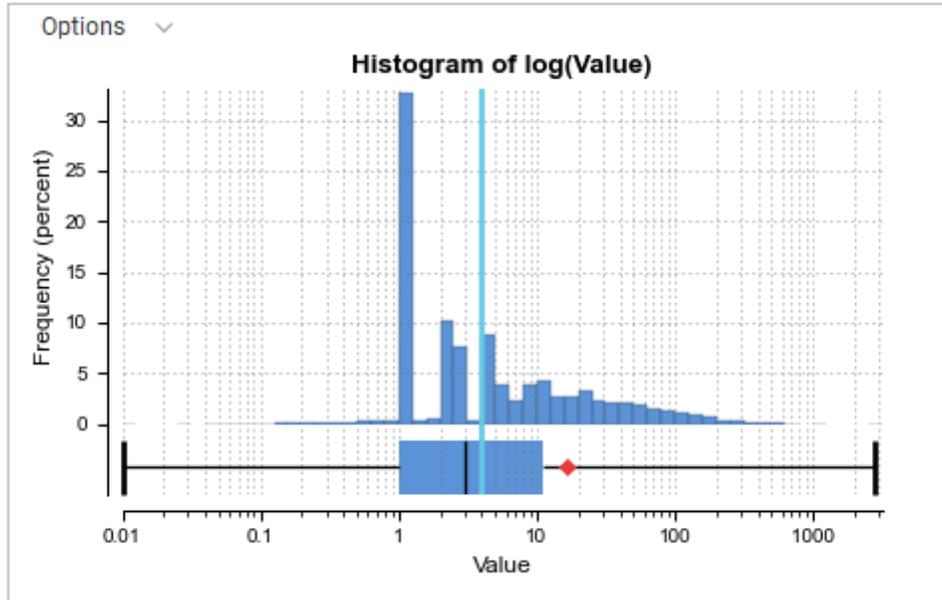


Figura 18. Cut-off de 4.0 g/t establecido para el modelo numérico. Elaborado en Leapfrog Geo

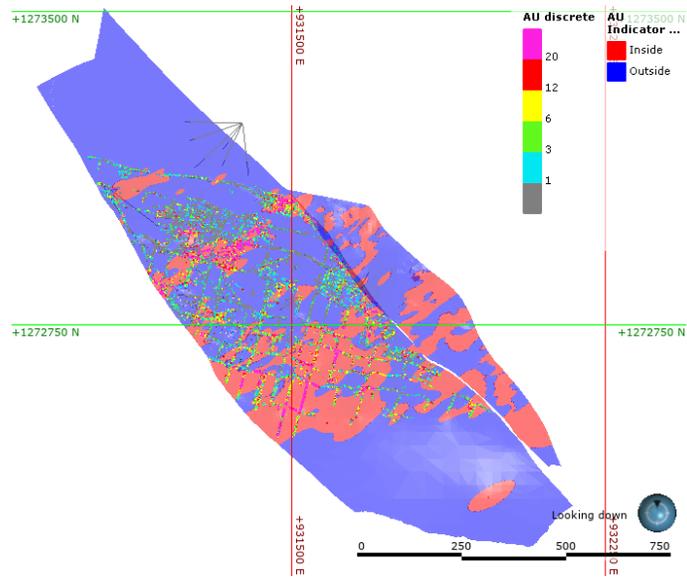


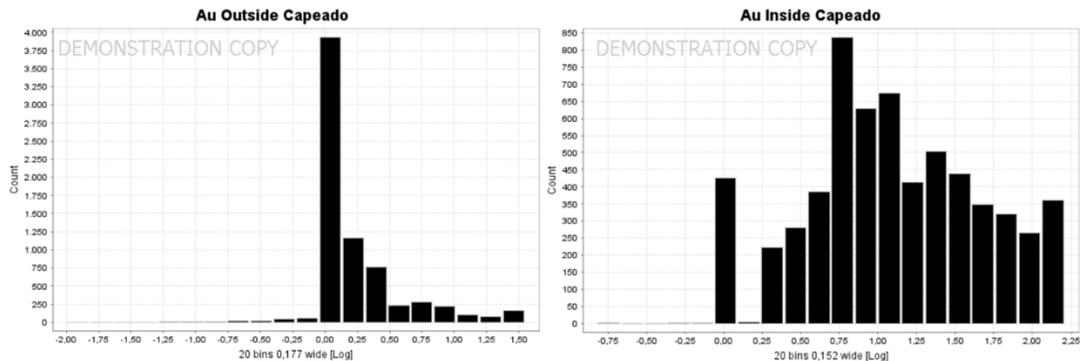
Figura 19. Envoltentes generadas para la definición de dominios. Elaborado en Leapfrog Geo

8.6. Caping (Tratamiento de valores anómalos)

Se Realizó el tratamiento de valores anómalos en cada uno de los dominios definidos. En la tabla 2, se muestra el umbral calculado para cada uno de los dominios y el número de valores capeados, y en la figura 20 se observa cómo este tratamiento disminuye la variabilidad de los datos en cada uno de los dominios respecto de los datos originales, es decir, hay una menor distancia entre la media y la desviación estándar y los parámetros de simetría se asemejan más a los de una distribución normal, especialmente en el dominio “*Inside*” que es el que tiene el interés económico y es susceptible de ser explotado.

Zona	Umbral	N. Outliers
Inside	35.34	90
Outside	161.80	207

Tabla 2. Umbral calculado y número de outliers reemplazados en cada dominio



	Datos Originales	Outside	Inside
Número de datos	17649	9487	8162
Mínimo	0.01	0.01	0.15
Máximo	2780.00	35.34	161.80
Media	14.79	2.91	28.21
Mediana	3.00	1.00	11.00
Desviación estándar	45.78	5.23	38.84
Skewness	20.10	4.61	2.13
Kurtosis	918.23	22.91	3.92
Coef. Variación	3.09	1.80	1.38

Figura 20. Histogramas y estadísticas básicas para cada dominio después de capping y contraste con datos originales

8.7. Análisis Estructural

A partir del módulo “Estimation” obtenido en *Leapfrog Geo*, se calcularon los modelos geoestadísticos para la variable contenido de oro (Au) en cada uno de los dominios definidos. Se transformó la variable tanto en la envolvente “Inside” como en la “Outside” mediante *Normal Score*, garantizando una distribución normal, es decir una media = 0 y una varianza cercana a 1. En las figuras 21 y 22 se observa la variable normalizada para cada uno de los dominios.

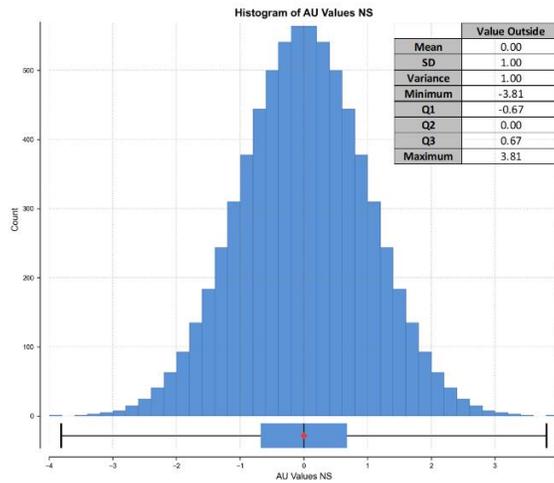


Figura 21. Histograma y estadística básica para el dominio “Outside”, con media 0 y varianza 1. Elaborado en *Leapfrog Geo*

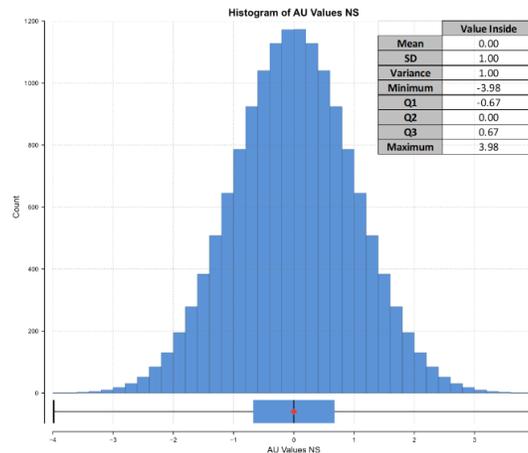


Figura 22. Histograma y estadística básica para el dominio “Inside”, con media 0 y varianza 1. Elaborado en *Leapfrog Geo*

Para el ajuste del Semivariograma y la construcción del Elipsoide de búsqueda, se utilizó un *Efecto Pepita* asumido igual a 0.328, un *Sill* o *Meseta* cercano a 1 dado que, para la variable transformada es cercano a la varianza, y para la orientación del Elipsoide se consideraron las direcciones de mayor continuidad de los datos, por lo que éste coincide con la distribución espacial del *Oreshoot* de la veta, en el dominio “Inside” (Azimut: NE, Dip 28°). En cuanto al dominio “Outside”, las dimensiones del eje mayor, semimayor y menor, se ajustaron manualmente, garantizando la mayor cantidad de pares ordenados. En las figuras 23 y 24, se observa el modelo espacial con los semivariogramas calculados para cada dominio. En el eje menor que corresponde a la dirección Z o la elevación vertical, no es necesario lograr un ajuste perfecto del semivariograma, debido a que los compósitos se realizaron teniendo en cuenta el espesor total de la veta.

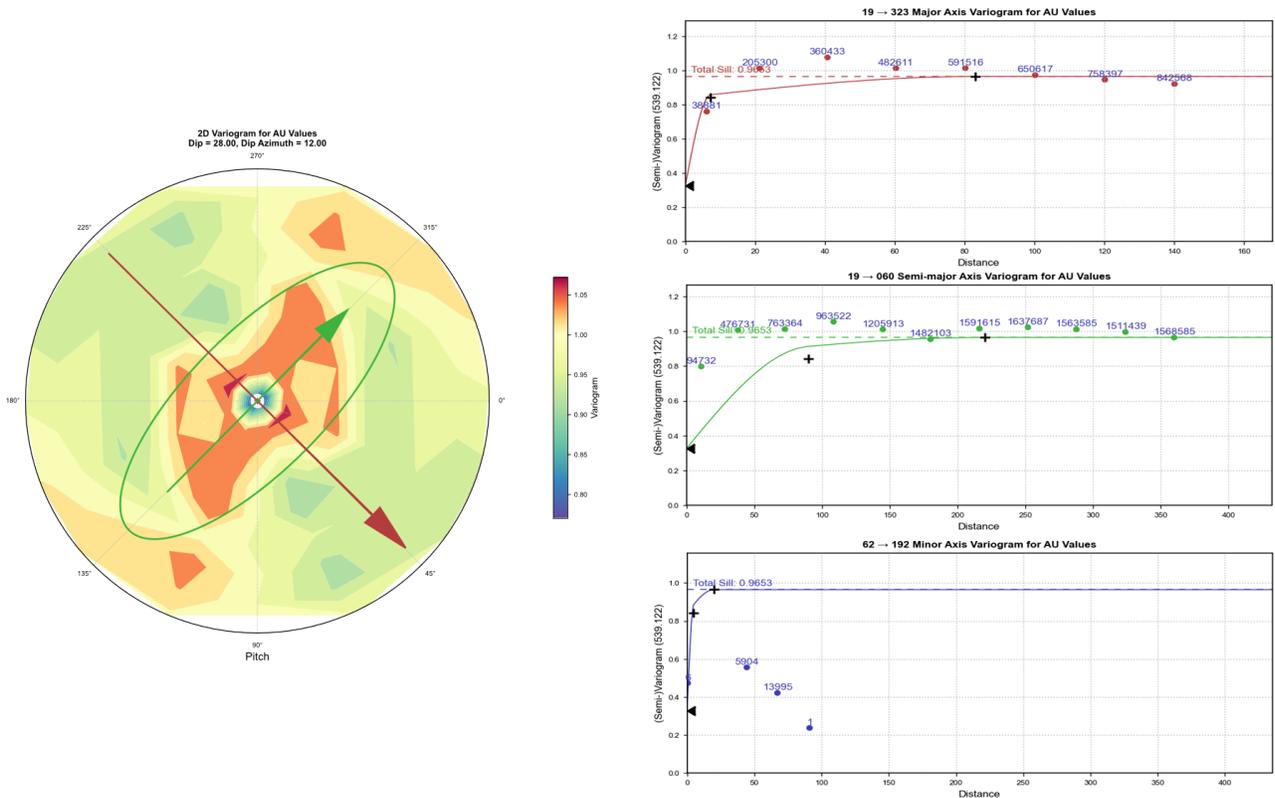


Figura 23. Modelo espacial calculado para el dominio Inside. Elaborado en Leapfrog Geo.

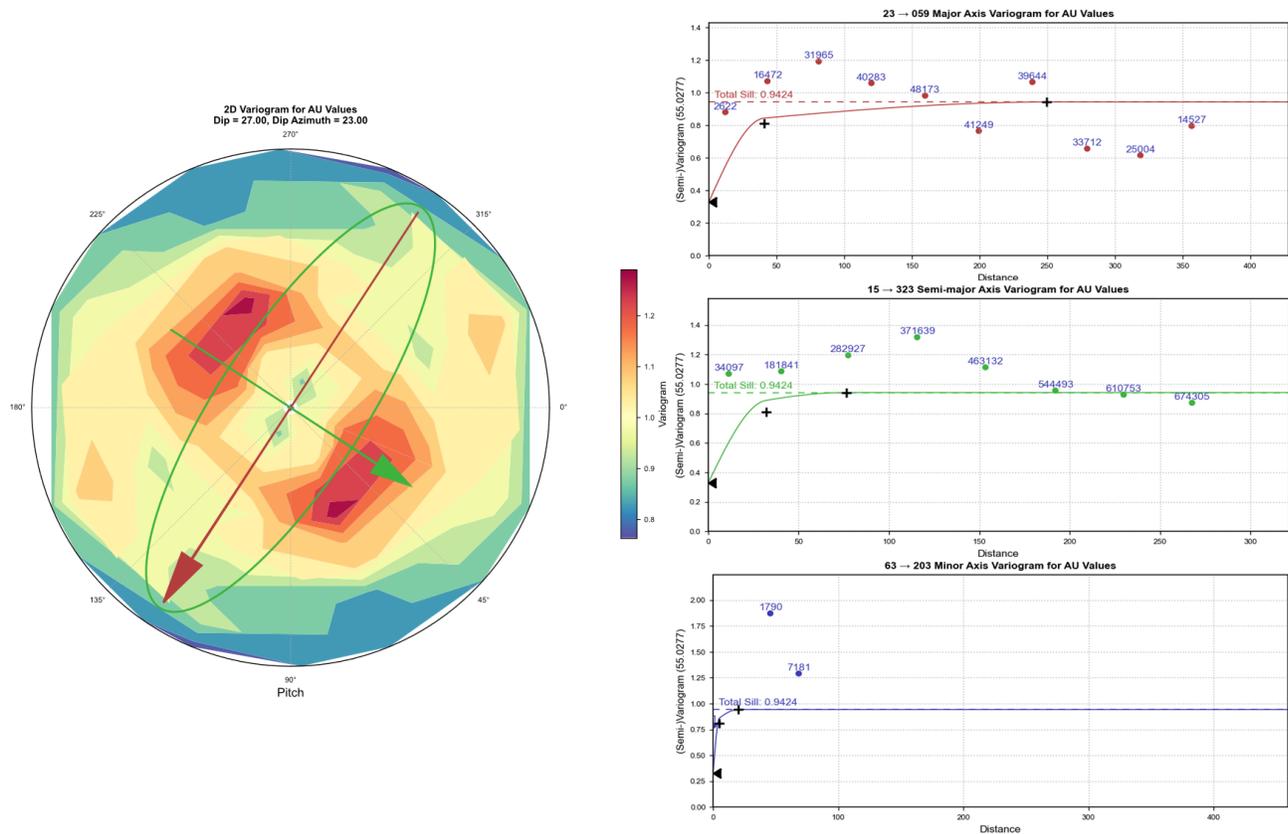


Figura 24. Modelo espacial calculado para el dominio Outside. Elaborado en Leapfrog Geo.

Se muestra que, en los semivariogramas ajustados para cada uno de los dominios de estimación, no coinciden exactamente los ejes del elipsoide de búsqueda por lo que se confirma la presencia de anisotropía. Situación común en depósitos de oro en vetas. (Morales, 2019)

8.8. Interpolación y validación del modelo

Se realizó una interpolación con los métodos de Kriging Ordinario (KO), Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW2) e Inverso de la Distancia al Cubo (IDW3) sobre los datos transformados, y se aplicó la función inversa a la transformación para volver a los valores originales. En cada uno de ellos se aplicó los parámetros definidos en el modelo espacial de cada dominio. En el caso del Kriging y los Inversos de la Distancia, se realizó un total de tres corridas

duplicando cada vez las dimensiones del elipsoide de búsqueda y disminuyendo la cantidad de muestras necesarias en la búsqueda. En la figura 25, se muestran los modelos de bloques generados a partir de cada uno de los métodos de interpolación.

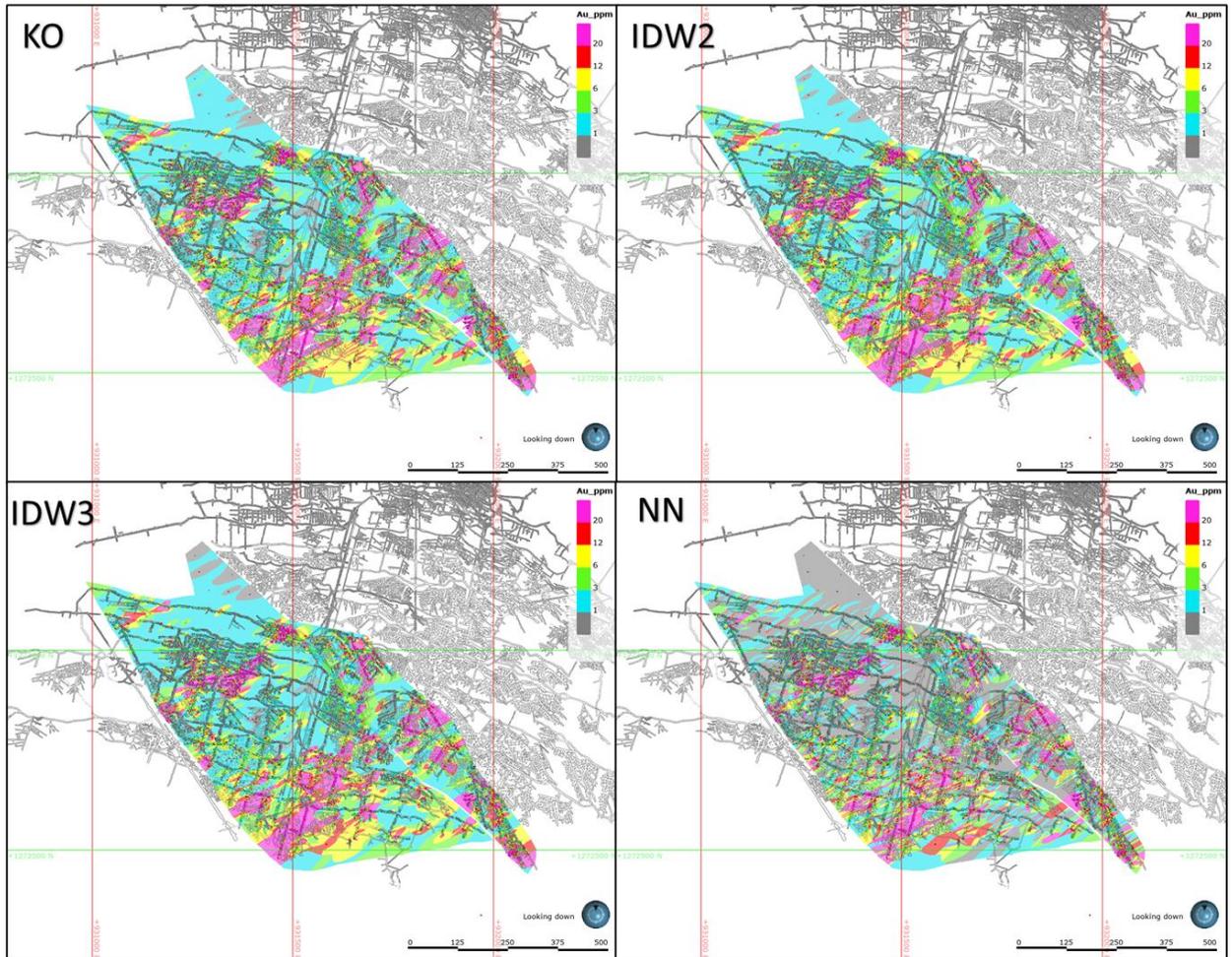


Figura 25. Modelos de bloques generados por cada método de interpolación. Elaborado en Leapfrog Geo

Se puede observar en todas las interpolaciones, que tal como se intuía en el EDA, hay una clara tendencia noreste en la que los valores altos se distribuyen o concentran de manera preferencial, lo que confirma la presencia de *Oreshoots* con una dirección aproximada de N45E y que se extienden a través de toda la zona de estudio. En la tabla 3, se muestra un comparativo

entre los estadísticos básicos de los modelos de bloques generados con cada uno de los métodos de interpolación.

Name	Block Count	Mean	SD	CV	Variance	Minimum	Median	Maximum
NN	748710	9.51	22.30	2.35	497.21	0.01	2.00	161.80
KO	748710	9.33	14.78	1.58	218.44	0.32	3.63	134.01
ID3	748710	9.51	16.29	1.71	265.27	0.03	3.58	161.76
ID2	748710	9.47	15.38	1.62	236.47	0.05	3.75	160.70

Tabla 3. Estadísticos básicos de los modelos de bloques generados por cada método de interpolación.

En la misma, se puede observar que tanto ID3 como ID2 y KO tienen coeficientes de variación y medias similares. Se toma como referencia el método NN como representativo para analizar la distribución de los valores originales de manera puntual y se compara con los anteriores descritos, es el método IDW3 cuya media se acerca más a la del NN (diferencias nulas), sin embargo, el KO es el que arroja una menor varianza, de manera que es el método seleccionado.

Cabe destacar, que al realizar un análisis de derivas (figura 26 y 27), se observa que efectivamente se obtiene una muy buena representatividad espacial de los valores interpolados con todos los métodos utilizados.

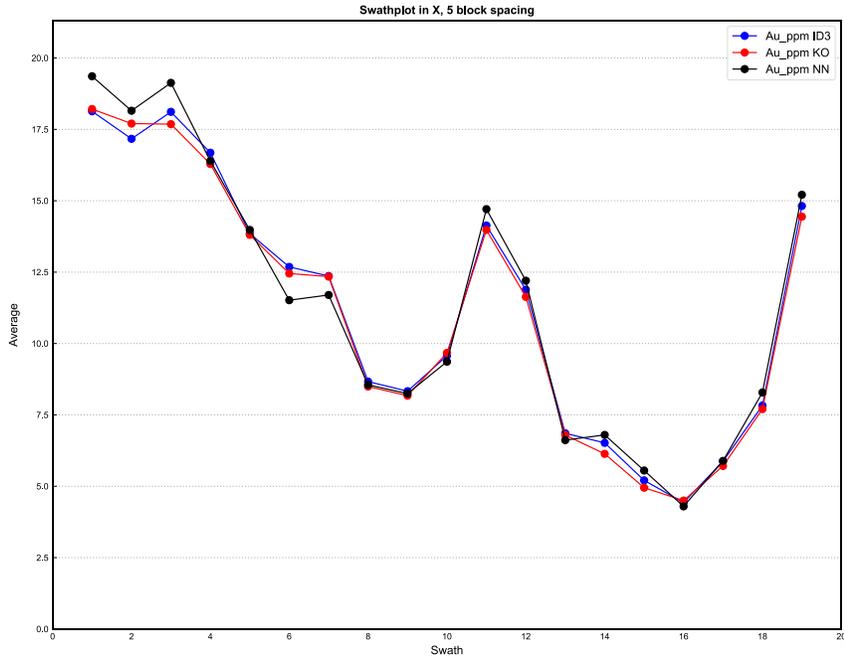


Figura 26. Swathplot a lo largo del eje X para cada método de interpolación. Elaborado en Leapfrog Geo.

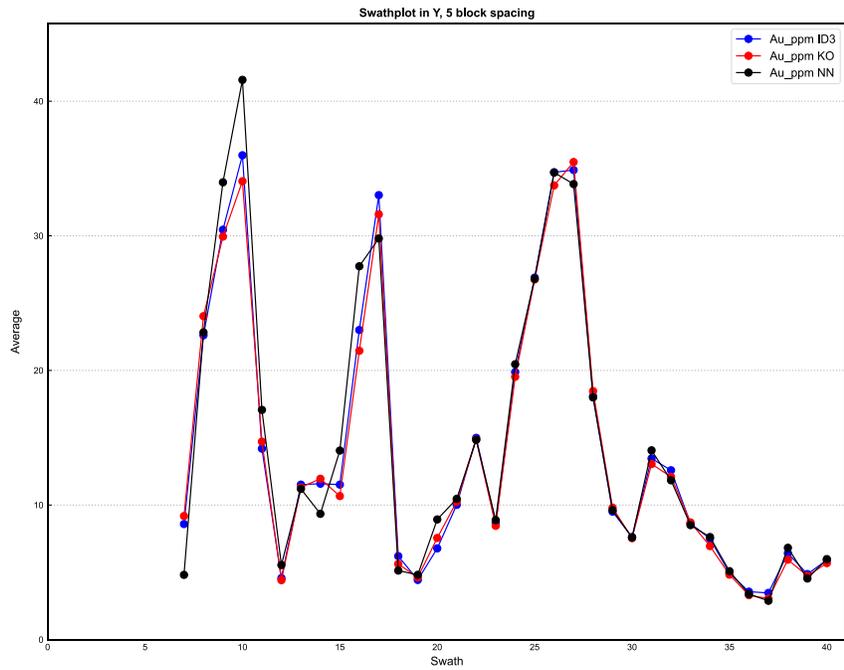


Figura 27. Swathplot a lo largo del eje Y para cada método de interpolación. Elaborado en Leapfrog Geo.

El KO a diferencia del IDW2, IDW3 y NN, permite mapear la precisión de la estimación, basado en la configuración y continuidad espacial de los datos, a través de la medida de varianza del kriging. En la figura 28, se observa la varianza del kriging obtenida para la interpolación con KO.

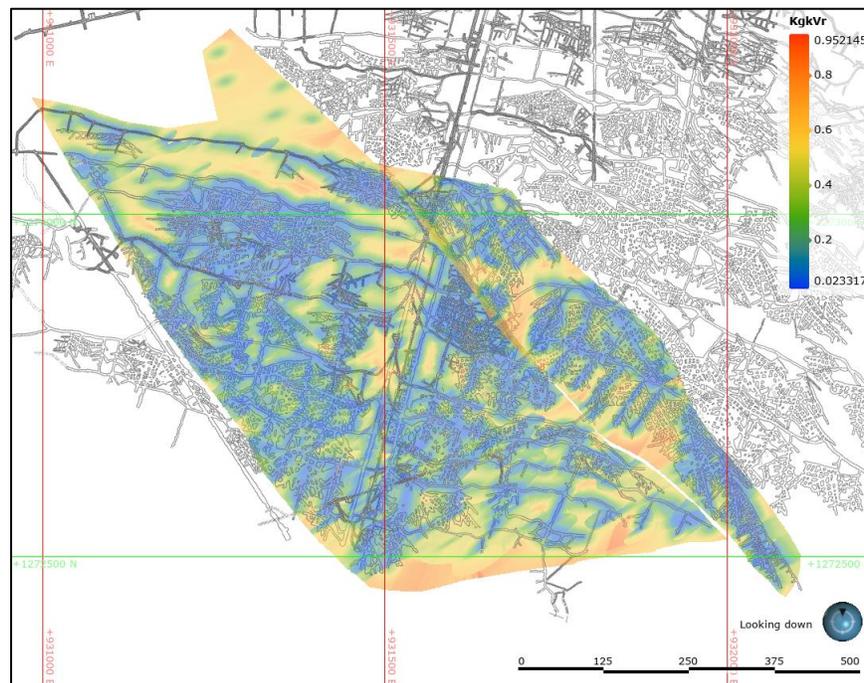


Figura 28. Varianza del Kriging obtenida en Interpolación con KO. Elaborado en Leapfrog Geo.

Adicionalmente, se realizó una validación gráfica para garantizar que existe una correspondencia coherente entre los datos o compósitos originales y los bloques generados a través del método KO. En la figura 29, se observa como dicha correspondencia se logró de manera satisfactoria.

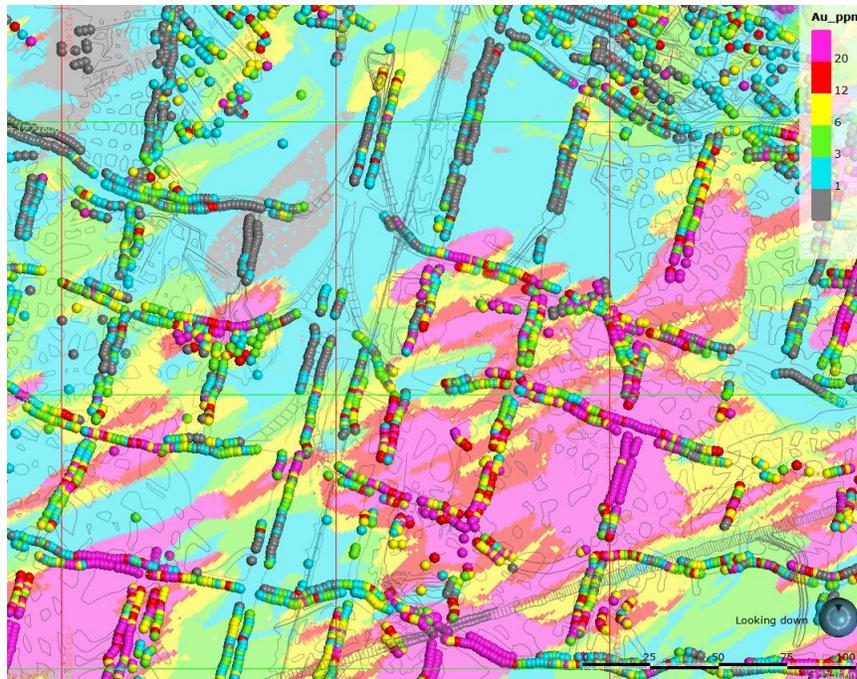


Figura 29. Validación gráfica, con compósitos y modelo de bloques generado mediante KO. Elaborado en Leapfrog Geo.

8.9. Categorización del recurso

Con el fin de llegar a un modelo de bloques más útil, para el proceso de planeación y toma de decisiones, se crea una variable cualitativa con categorías, adicional al valor de contenido de oro (Au), la cual se obtiene a partir de la interpolación, para clasificar el recurso de acuerdo con la certidumbre que se tiene acerca de la existencia de éste. Para esto fue utilizada una función de distancia, generando un *buffer* concéntrico alrededor de los compósitos, el cual es clasificado en tres categorías diferentes. En la figura 30, se observan las categorías definidas para la clasificación de los recursos, así como la distribución espacial de las mismas.

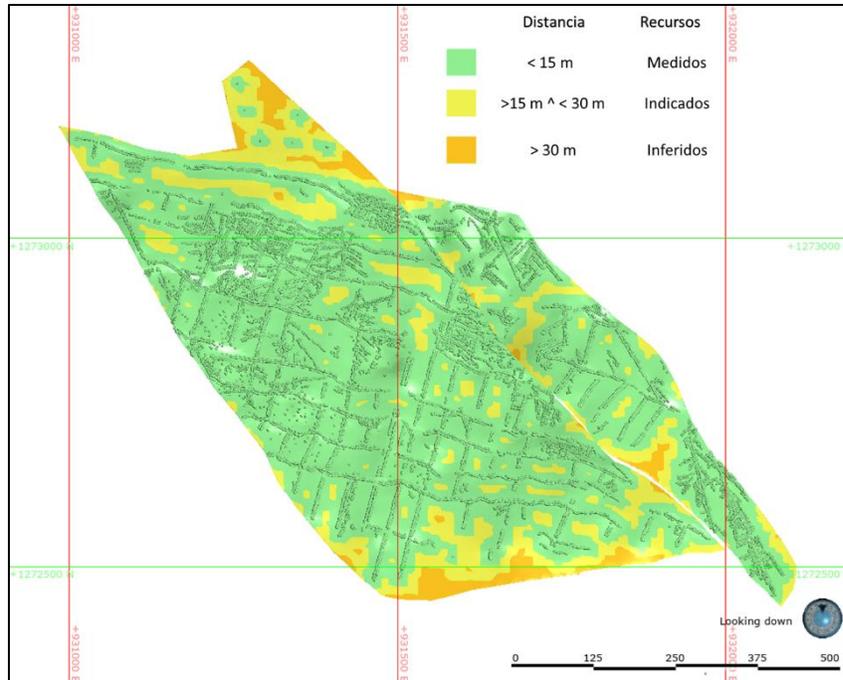


Figura 30. Categorización del recurso, en función a la distancia de los compósitos. Elaborado en Leapfrog Geo.

8.10. Reporte de recursos

Los recursos de oro que posee la veta *Providencia* en el área de estudio, se cuantifican utilizando los bloques generados a través de la interpolación, los cuales se encuentran por encima del *cut-off* establecido para la mina *Providencia* en 4.0 g/t Au de la siguiente manera:

$$\text{Onzas troy Au (t. oz)} = \frac{(V * p * Au)}{31.1035 \text{ g}}$$

Siendo,

V = Volumen de los bloques que se encuentran por encima del *cut-off* (cm^3)

p = Densidad de la veta, se utiliza un valor constante de 2.7 g/cm^3

Au = Contenido de oro de los bloques que se encuentran por encima del *cut-off* g

En la tabla 4 y figura 31 se muestra el reporte de recursos generado, y el mapa correspondiente a dicho reporte.

Report

Cut-off: Au_ppm KO \geq 4.00 g/t

Density: 2.7 g/cm³

Categoría	Mass t	Average Value Au_ppm KO g/t	Material Content Au_ppm KO t. oz
< 15 Medidos	329,151	22.89	242,223
< 30 Indicados	34,747	21.59	24,124
< 60 Inferidos	4,718	16.66	2,527
Total	368,616	22.69	268,875

Tabla 4. Reporte de Recursos

La gran mayoría de los recursos están contenidos dentro de la categoría de *medidos*, con cerca de 329,151 toneladas que contienen aproximadamente 242,223 onzas troy de Au; en la categoría de recursos *indicados*, se tienen cerca de 24,124 onzas troy, lo que representa el 9.4% de los recursos estimados; por su parte, de la categoría de recursos *inferidos* se tiene solamente el 1.27% de los recursos.

De modo que, se tiene una certeza importante sobre la mayoría de los recursos estimados dentro de la zona de estudio (figura 31).

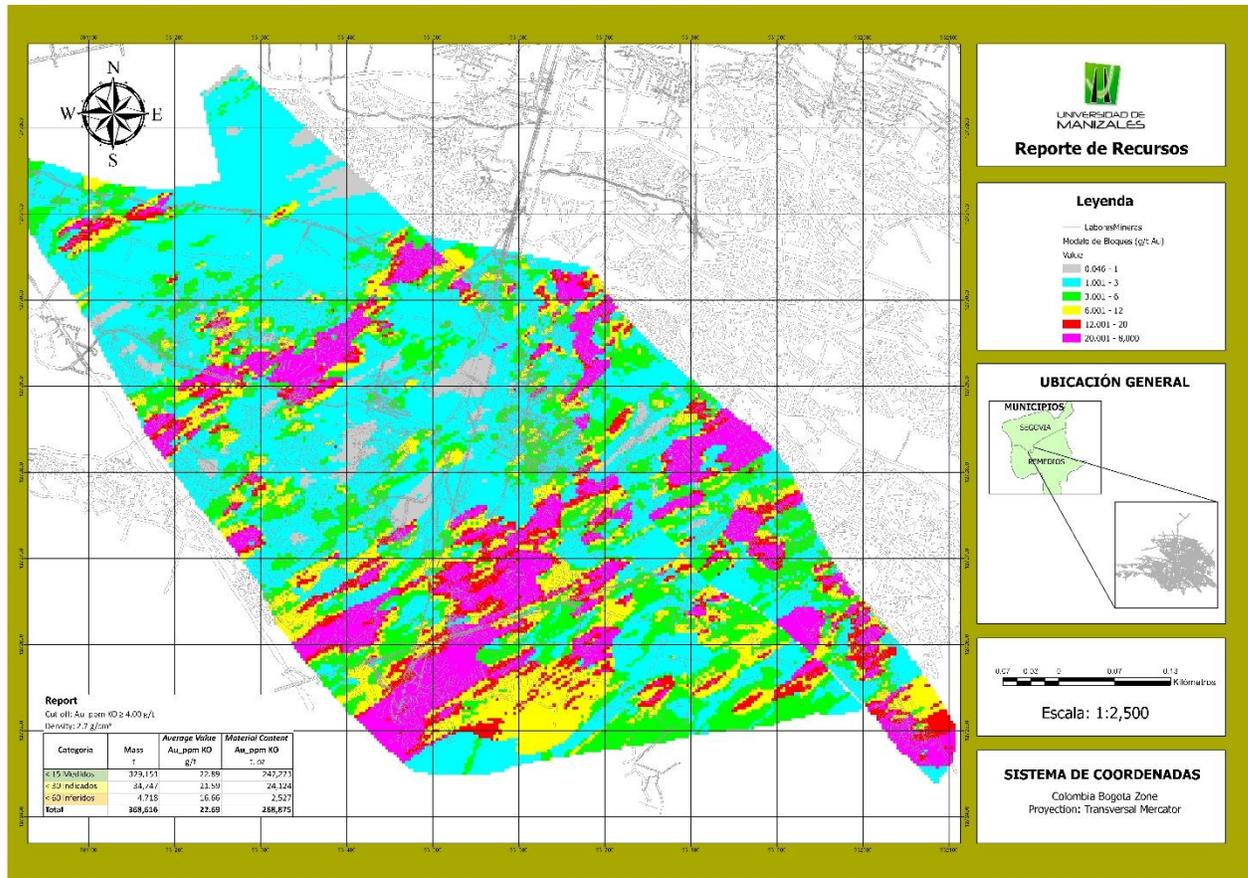


Figura 31. Mapa de reporte de Recursos. Elaborado en ArcGIS Pro.

8.11. Reporte de Reservas

En una empresa minera, las reservas minerales se componen de todos aquellos bloques de recursos, los cuales presentan un alto nivel de certidumbre de su existencia (medidos e indicados), éstos se encuentran por encima del cut-off, lo que resulta económicamente viable para la compañía. Adicionalmente, es posible acceder a ellos mediante infraestructura minera para su extracción efectiva.

En el caso de los métodos de extracción utilizados en la mina *Providencia*, éstos implican labores de minado con una altura mínima de 1.50m de altura, además de que la veta en la

mayoría de su extensión tenga un espesor inferior a este. También debe considerarse, un factor de dilución resultante de ponderar el contenido de oro en el espesor de la veta, dentro de 1.50 m de la altura de minado. Siendo así, el cálculo de reservas de oro contenidas en la veta

Providencia dentro de la zona de interés es:

$$\text{Onzas troy Au (t. oz)} = \frac{(V * p * (Au \text{ dil}))}{31.1035 \text{ g}}$$

Siendo,

-*V* = Volumen de los bloques medidos e indicados que se encuentran por encima del cut-off (cm^3)

-*p* = Densidad de la veta, se utiliza un valor constante de 2.7 g/cm^3

$$Au \text{ dil} = \left(\frac{Au * e}{1.5 \text{ m}} \right) \text{ g}$$

-*Au* = Contenido de oro de los bloques que se encuentran por encima del cut-off *g*

-*e* = Espesor del bloque (*m*)

En la tabla 5 y figura 32 se muestra el reporte de reservas generado, además del mapa correspondiente a dicho reporte.

Report

Cut-off: $Au_dil_KO \geq 4.00 \text{ g/t}$

Density: 2.7 g/cm^3

Categoría	Mass t	Average Value Au g/t	Material Content Au t. oz
Reservas	242,480	19.63	153,001

Tabla 5. Reporte de Reservas.

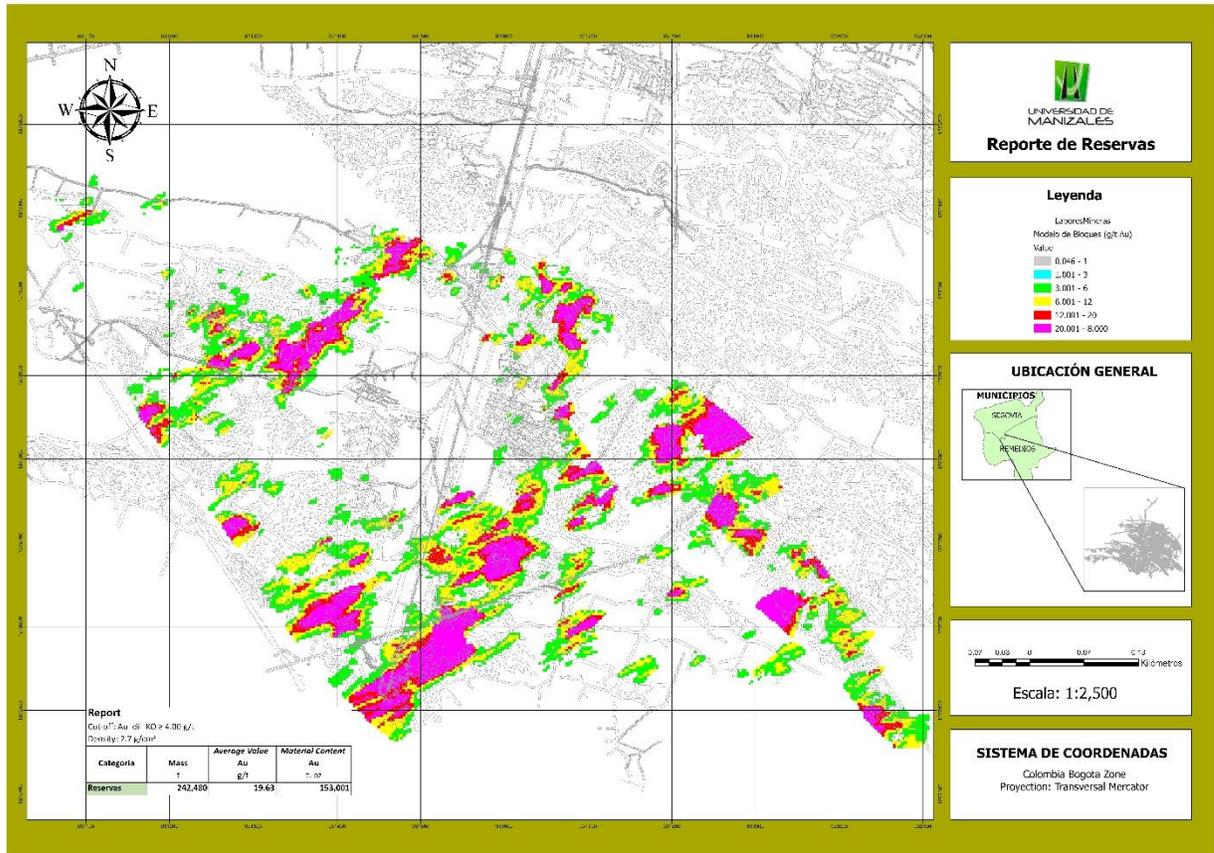


Figura 32. Mapa de reporte de Reservas. Elaborado en ArcGIS Pro.

Finalmente, se puede observar que las reservas, es decir el material que se puede minar de manera efectiva y económicamente rentable para la compañía, se concentra en su mayoría en las zonas en las que previamente se definió el dominio *Inside*, además, los bloques coinciden con la orientación NE del Oreshoot. Las reservas presentes en la zona de estudio, comprenden aproximadamente 242,480 toneladas de material minable a un tenor de corte de 19.63 g/t Au, lo cual equivale a 153,001 onzas troy.

9. CONCLUSIONES

-La metodología propuesta y aplicada en esta investigación, permite reportar con precisión los recursos y reservas minerales, debido a que considera la forma en que el espesor y el contenido de oro (Au) varían espacialmente, identifica tendencias y se acotan las zonas de interés económico.

-El análisis exploratorio realizado mediante estadísticos básicos y gráficos, dio como resultado que, en el yacimiento, la variable Contenido de Oro (Au) presenta una distribución estadística aproximadamente lognormal ya que, al realizar la transformación logarítmica a los datos, éstos se acercan bastante a un comportamiento Gaussiano.

-Se confirma la presencia de trenes de mineralización u *Oreshoots*, donde el oro se concentra de manera preferencial; en el caso de *Providencia* estos siguen una orientación aproximada de N45°E.

-En el análisis variográfico, se pudo apreciar una anisotropía geométrica, característica de cuerpos vetiformes mineralizados.

-El método geoestadístico del Kriging Ordinario resulta adecuado teniendo en cuenta el área de estudio, debido a que presenta los valores más bajos de varianza, y se logra una correspondencia satisfactoria a través de la validación gráfica y la comparación con otros métodos de interpolación.

- En el área de estudio se tiene una certeza importante, cerca de 268,875 onzas troy de Au en recursos (entre medidos, indicados e inferidos) y 153,001 onzas troy de Au en reservas.

-Es posible realizar el cálculo y estimación de recursos y reservas de Oro (Au), para la zona de estudio definida en la mina *Providencia*, a partir de métodos geoestadísticos en conjunto con un Sistema de Información Geográfica (SIG).

-Para un eficiente cálculo de reservas y estimación de recursos minerales, a través de métodos geoestadísticos, es fundamental un correcto muestreo y modelo geológico.

-Los Sistemas de Información Geográfica en conjunto con la geoestadística, han permitido el avance de metodologías mucho más eficientes para el cálculo y estimación de recursos y reservas minerales, debido a que facilitan el estudio de las características del depósito mineral, lo que a su vez contribuye a la toma de decisiones dentro de la compañía.

-La relevancia del cálculo de reservas y estimación de recursos minerales dentro de las compañías mineras, hace que cada día se incentive y promueva el interés de inversión en softwares y herramientas que complementen las metodologías dadas a partir de Geoestadística en conjunto con SIG.

10. RECOMENDACIONES

-Replicar la metodología en las demás vetas y minas de la compañía, con el fin de obtener modelos propios de recursos y reservas que sirvan como herramienta para la toma de decisiones y la planificación minera.

-Dada la distribución espacial de las reservas minerales, a lo largo de Oreshoots, resultaría conveniente enfocar los futuros planes de exploración y los desarrollos de infraestructura minera siguiendo la proyección de dichos Oreshoots sobre el buzamiento en profundidad.

-Realizar una comparación o conciliación entre algunos bloques, una vez estos sean explotados, considerando los valores estimados, con el fin de confirmar con certeza la efectividad de la metodología.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Afeni, T., Akeju, V., & Aladejare, A. (2021). A comparative study of geometric and geostatistical methods for qualitative reserve estimation of limestone deposit. *Geoscience Frontiers*, 12(1), 243-253.
- Alcaldía Municipal de Segovia. (3 de Julio de 2018). www.segovia-antioquia.gov.co.
Obtenido de <http://www.segovia-antioquia.gov.co/municipio/nuestro-municipio>.
- Álvarez, M., Ordóñez, O., Valencia, M., & Romero, A. (2007). Geología de la zona de influencia de la Falla Otú en el distrito minero Segovia-Remedios. *Dyna*, 74(153).
- Betancur Vargas, T., Londoño Ciro, L., & Mejía Rivera, O. (2007). Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrogeología del bajo cauca antioqueño. *Dyna*. 74(152).
- Buendía Benito, J. W. (2020). Aplicación de simulación geoestadística utilizando software minero para la determinación de altura óptima de banco en tajo Chaquicocha–Minera Yanacocha.
- Carmona, A. D., & Gil, J. Q. C. (2019). Complejidades de la estimación de recursos en yacimientos tipo Bechi en el noroeste de Pinar del Río, Cuba, usando Geoestadística no Lineal. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (45), 26-33.
- Centeno Velásquez, E. R. (2014). Optimización en la estimación de recursos y límite de explotación en el proyecto Michiquillay.
- Centro Provincial De Gestión Minero Agroempresarial Del Nordeste Antioqueño. (2020). Glosario Técnico Minero. Recuperado de http://centroprovincialnordeste.com.co/wp-content/uploads/transparencia/GLOSARIO_CPGMAE.pdf

-Costa, J. (2003). Reducing the Impact of Outliers in Ore Reserves Estimation. *Mathematical Geology*, 35(3), 323-345.

-Cuador Gil, J. Q. (2002). Estudios de estimación y simulación geoestadística para la caracterización de parámetros geólogo-industriales en el yacimiento laterítico Punta Gorda.

-Cuenca Manya, K. A. (2018). Cálculo de los recursos minerales del sulfuro masivo volcanogénico del depósito VMS el domo, ubicado en la provincia de Bolívar (Bachelor's thesis).

-Díaz, M. F., Ramirez, J. G. E., & Cabrera, A. O. (2015). APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN PARALELA PARA LA ESTIMACIÓN EFICIENTE DE RECURSOS MINERALES.

-Echeverry, S., Cárdenas, A., Ordoñez, O., & Muñoz, O. (2009). ASPECTOS ESTRUCTURALES Y RELACIONES DE ALGUNOS SISTEMAS VETIFORMES DEL DISTRITO MINERO SEGOVIA-REMEDIOS. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 19-28.

-Emery, X. (2011). *Geoestadística*. Santiago: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

-Esri. (s. f.). Métodos determinísticos para la interpolación espacial. Arcgis desktop.ESRI. Recuperado de: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/geostatistical-analyst/deterministic-methods-for-spatial/>

-ESRI. (s. f.). Cómo funciona Kriging—Ayuda | ArcGIS for Desktop. ArcGIS for Desktop ESRI. Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how->

kriging-

works.htm#: %7E:text=El%20kriging%20ordinario%20es%20el,una%20raz%C3%B3n%20cient%C3%ADfica%20para%20rechazarla.

-Garcia, P. (2021). ¿Qué es un SIG, GIS o Sistema de Información Geográfica? Geoinnova.
https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sig-gis-o-sistema-de-informacion-geografica/?gclid=Cj0KCQjw6pOTBhCTARIsAHF23fK50ub9tYL5gNFQe3D6TZZbUIRDktVOJSNZ4Nt3R2X4SrOAb81R5toaArStEALw_wcB

-Gentoiu, M. M., & Acosta Breal, J. (2014). Utilización de los datos de georradar en la estimación de recursos minerales con el empleo de la geoestadística, en yacimientos ferroniquelíferos. Anuario de la Sociedad Cubana de Geología No, 2.

-Geoinnova. (2019). ¿Qué es la geoestadística y cuáles son los principales análisis geoestadísticos? Geoinnova. Recuperado de https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-la-geoestadistica-analisis-geoestadisticos/?gclid=Cj0KCQjw6pOTBhCTARIsAHF23fIcsyFbNPJCursn_asGFyndi2Jlr6bHySdXTKImmJ-i0AscHqR_dXQa.

-Glosario términos estadísticos. (2017). Servidor alicante. Recuperado de <https://glosarios.servidor-alicante.com/terminos-estadistica/dominios>

-González, J., Ordóñez, O., & Terá, B. (2010). Geología de la parte oriental del Distrito Minero Segovia-Remedios. Boletín de Ciencias de la Tierra, (28).

-Gonzalez, S., & Ortiz, F. (2017). UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS SIG PARA EL ANÁLISIS ESPACIAL DE DATOS DE EXPLORACIÓN GEOLÓGICA EN EL PROYECTO MINERO SAN JOSE - B2GOLD CORP. Manizales.

-Gual, J., Valente, J., & Girodo, A. (1983). GEOESTATISTICAL MINE PLANNING AT COPPER MINES OF CAMAQUA, BRAZIL. *IFAC Automation in Mining*, 16(15), 687-696.

-Harris, J., Wilkinson, L., Heather, K., Fumerton, S., Bernier, M., Ayer, J., & Dahn, R. (2001). Application of GIS Processing Techniques for Producing Mineral Prospectivity Maps— A Case Study: Mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. *Natural Resources Research*, 10(2), 91-124.

-Hernandez Guerra, H (2017). Fundamentos de la estimación de recursos minerales. Curso de estimación de recursos minerales nube minera – plataforma e learning gratuita

-Herrera, C., & Jorge, J. (2019). “ESTIMACIÓN DE RESERVAS MINERAS UTILIZANDO SOFTWARE COMERCIAL Y SOFTWARE LIBRE EN LA COMPAÑÍA MINERA VOLCAN S.A.A. - UNIDAD CERRO DE PASCO" (tesis de maestría). Universidad Nacional de Huancavelica, Lircay, Huancavelica.

-Hua, S., Li, X., Ju, J., Xiao-Jun, M., & Qun, W. (2013). Copper Spatial Distribution Characteristics in Typical Mining Area Base on Gis Technology. *Information Technology Journal*, 12(21), 6345-6349.

-Jalloh, A., Kyuro, S., Jalloh, Y., & Barrie, A. (2016). Integrating artificial neural networks and geostatistics for optimum 3D geological block modeling in mineral reserve estimation: A case study. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26(4), 581-585.

-Lagos, G. (2011). ESTUDIO DE MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN ROBUSTA PARA EL PROBLEMA DE PLANIFICACION DE PRODUCCIÓN EN MINERÍA A CIELO ABIERTO. Santiago: Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas.

-Lee, S., Joo Oh, H., Ho Heo, C., & Park, I. (2014). A case study for the integration of predictive mineral potential maps. *Central European Journal of Geosciences*, 6(3), 373-392.

-Ministerio de Minas y energía. (2003). GLOSARIO TÉCNICO MINERO (N.º 1).
http://centroprovincialnordeste.com.co/wp-content/uploads/transparencia/GLOSARIO_CPGMAE.pdf

-Minitab. (s. f.). Identificar valores atípicos - Minitab. (C) Minitab, LLC. All rights Reserved. 2022. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/data-concepts/identifying-outliers/>.

-Morales Gómez, F. (2019). Evaluación geoestadística por medio del método de condicionamiento uniforme para un caso de estudio de un yacimiento de oro localizado en el departamento de Antioquia, Colombia.

-Novillo, B., Bassan, J., & Rossi, M. LOS RIESGOS EN LOS FUNDAMENTOS DEL MODELO DE RECURSOS RECUPERABLES.

-País Cerna, G. E. (2021). Definición de un nuevo criterio de categorización de recursos minerales basado en simulaciones geoestadísticas.

-Pérez Riaño, S. L. (2016). Aplicación de geoestadística como metodología para la estimación de recursos de un yacimiento sedimentario (Minas Paz del Río SA).

-Porras Velázquez, A. (s. f.). Método Kriging de inferencia espacial. Centro público de investigación CONACYT. Recuperado de <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/160/1/16-M%C3%A9todo%20Kriging%20de%20Inferencia%20espacial%20->

%20%20Diplomado%20en%20An%C3%A1lisis%20de%20Informaci%C3%B3n%20Geoespacial.pdf

-¿Qué es la Geoquímica? | El geólogo geoquímico. (2019, 26 abril). Tierra y Tecnología.

Recuperado de: <https://www.icog.es/TyT/index.php/2009/11/que-es-la-geoquimica-el-geologo-geoquimico/>.

-Restrepo, J., & Toussaint, J. (1988). TERRANES AND CONTINENTAL ACCRETION IN THE COLOMBIAN ANDES. Episodes, 189-193.

-Significado de Yacimiento. (2014). Significados. Recuperado de: <https://www.significados.com/yacimiento/>.

-Sironvalle, M. A. A. (2007). Estimación de recursos mineros. USACH.

-SRK Consulting. (2013). NI43-101 TECHNICAL REPORT ON A MINERAL RESOURCE ESTIMATE ON THE SEGOVIA AND CARLA OPERATIONS. Segovia.

-SRK Consulting. (s.f.). Geoestadística (estimación de Recursos Minerales). Recuperado de <https://www.srk.com/es/servicios/geoestadistica>

-Tolentino Barrios, F. A. (2019). Estimacion de recursos y reservas con el uso de software minero para la explotacion del proyecto minero-Don Javier.

-Uygucgila, H., & Konukb, A. (2015). Reserve Estimation in Multivariate Mineral Deposits Using Geostatistics and GIS. Journal of Mining Science, 51(5), 993-1000